AIE Agence internationale de l'énergie

CANMET

Les émanations des gaz d'échappement des véhicules lourds

L'ENERGIE DE NOS RESSOURCES

NOTRE FORCE CRÉATRICE

SP91-1F

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1992
N° de catalogue M38–15/91–1F
ISBN 0–662–18980–9

93-00112/

LES ÉMANATIONS DES GAZ D'ÉCHAPPEMENT DES VÉHICULES LOURDS

Préparé par

SYPHER : MUELLER INTERNATIONAL INC.
Ottawa (Canada)

Novembre 1990

AIE
Agence internationale de l'énergie

CANMET
Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie

AVANT-PROPOS

Le 27 septembre 1990, la Air Resources Board de la Californie adoptait une série de règlements stricts sur les émanations des nouveaux véhicules. L'application de ces mesures créait un précédent décisif dans l'industrie de la fabrication et de la vente d'automobiles. Elles ont été à l'origine d'un phénomène qui devrait avoir des répercussions à l'échelle mondiale puisque les gouvernements s'intéressent de plus en plus à l'air que nous respirons.

Cette réglementation concerne l'application de normes rigoureuses en matière d'émanations nocives provenant des automobiles, en particulier celles qui contribuent à augmenter la concentration d'ozone au niveau du sol et la quantité de particules provenant des véhicules lourds et qui sont à l'origine des problèmes respiratoires. Pour la première fois, un organisme de réglementation obligeait les fabricants de moteurs et d'automobiles du monde entier à prendre des mesures directes en vue de perfectionner les technologies antipollution.

Les autobus et camions lourds, une composante intégrale du réseau de transport mondial, représentent un élément important dans le contexte des nouveaux règlements. De nos jours, presque tous les camions et autobus lourds sont propulsés par des moteurs diesel qui sont avantageux sur les plans de la consommation de carburant, de la fiabilité et de la durabilité. Toutefois, les moteurs diesel classiques dégagent d'importantes quantités de gaz carbonique, d'oxydes d'azote, de composés organiques volatils et de particules dans l'atmosphère.

Bien que les moteurs diesels actuels ne puissent satisfaire les nouvelles normes rigoureuses relatives aux émanations des véhicules automobiles, on dispose maintenant de la technologie voulue pour les doter d'appareils leur permettant de fonctionner conformément aux normes établies. Par exemple, l'utilisation de pièges à particules réduit substantiellement les dégagements de particules et permet l'utilisation du traitement catalytique pour réduire les émanations de gaz carbonique et d'hydrocarbures. Par ailleurs, des progrès technologiques considérables ont été réalisés grâce à l'emploi de carburants de rechange tels que le méthanol et le gaz naturel pour alimenter les moteurs de véhicules lourds.

Les technologies des carburants de rechange seront bientôt à point, mais il y a des lacunes à combler sur le plan de l'information. Notons plus particulièrement

que le rôle joué par les gouvernements et les organismes de réglementation dans le contrôle ou la limitation des émanations des moteurs de véhicules lourds est assez mal défini. Par ailleurs, on ne voit pas très bien comment les règlements actuels sur les émanations s'appliquent aux moteurs au méthanol et autres carburants de rechange utilisés dans les moyens de transport et en quoi ils les concernent.

En 1987, le Canada, les États-Unis, le Japon, la Suède et l'Italie se sont mis d'accord pour collaborer à la préparation de l'annexe III concernant les expériences réalisées sur des moteurs à alcool de véhicules lourds sous les auspices de l'Agence internationale de l'énergie (AIE). Suite à la rédaction de ce document, les divers pays membres soulevèrent la question des différences entre les normes et les méthodes d'essai touchant la mesure des émanations. C'est pour apporter une solution à ce problème que le présent rapport sur les émanations des gaz d'échappement des moteurs de véhicules lourds a été préparé.

De nombreux pays ont fixé des limites à l'émanation des polluants, mais les méthodes servant à déterminer ces limites varient considérablement. Dans le cadre de l'accord sur les carburants automobiles de rechange, l'AIE a reconnu la nécessité de constituer un forum international pour favoriser l'échange d'informations sur les émanations des gaz d'échappement des moteurs de véhicules lourds. Cet échange d'informations aidera les gouvernements à mettre sur pied l'environnement réglementaire répondant aux besoins d'un marché de l'automobile en évolution. Par ailleurs, cet échange permettra d'étudier les possibilités d'uniformiser une nouvelle législation dans un cadre international.

Cet accord a permis de créer une base de données sur les moteurs alimentés à l'alcool et sur les émanations des carburants diesel et à base d'alcool, dont pourront profiter aussi bien les gouvernements que l'industrie puisqu'ils oeuvrent conjointement en vue de trouver des moyens d'affronter les défis auxquels ils font face.

Dr Pier-Paolo Garibaldi
Président du Comité exécutif
Accord de L'AIE sur l'utilisation des carburants de rechange pour moteurs

INTRODUCTION

Le 1er mai 1991

À tous les participants,

Le Canada a le plaisir d'imprimer et de diffuser le présent rapport intitulé "Les émanations des gaz d'échappement des véhicules lourds".

Ce rapport fait suite à l'ouvrage rédigé par l'agent responsable de l'Annexe 3, intitulé "Les carburants à l'alcool dans les moteurs à grande puissance", qui a été conçu initialement dans le but d'accumuler, de synthétiser, d'analyser et de diffuser des informations sur les expériences mettant en cause de nombreux camions et autobus, menées dans les pays qui avaient approuvé l'accord sur l'utilisation des carburants de rechange pour moteurs. Il fut en outre permis d'y inclure des données provenant de pays non membres lorsque les données en question faisaient partie du domaine public.

Il devint vite apparent que, sur les plans des émanations et des essais sur les émanations, chaque pays disposait de son propre ensemble de méthodes et de normes. En conséquence, la diversité des techniques de mesure gêne les comparaisons entre parcs de véhicules concernant les émanations et même la consommation de carburant. Étant donné que les préoccupations relatives à la propreté de l'air et de l'environnement prennent de plus en plus d'importance, nous devons chercher les moyens d'établir des comparaisons à partir des mêmes lignes directrices.

Le présent rapport vise à faire ressortir les diverses méthodes et normes qui prévalent dans les pays membres et certains autres pays choisis. Par ailleurs, il est important de souligner que ce rapport pourrait servir d'assise sur laquelle on pourrait élaborer un ensemble de normes uniformes relatives aux essais concernant les émanations.

À l'origine, ce rapport ne devait être remis qu'aux pays participants et constituer un élément de l'ensemble de l'annexe. Toutefois, le comité exécutif de l'accord sur l'utilisation des carburants de rechange a décidé que ce document était assez important pour devenir autonome et être publié en tant que rapport distinct sous les auspices de l'Agence internationale de l'énergie (AIE).

Cinq pays ont donné leur accord à la publication de l'annexe III et contribué à sa préparation. Ce sont le Canada, l'Italie, le Japon, la Suède et les États-Unis.

En plus des exemplaires du rapport envoyés aux participants et de ceux qui ont été adressés au siège de l'AIE, le pays membre responsable dispose d'un certain nombre d'exemplaires supplémentaires que l'on peut obtenir en s'adressant au soussigné.

Il serait souhaitable que l'on fasse mieux connaître les avantages du concept d'universalité des méthodes d'essai et des normes relatives aux émanations. Le présent rapport peut aider à faire comprendre l'ampleur du problème et à éclairer ceux qui sont en mesure d'effectuer des changements. Le soussigné et les autres membres de l'accord de l'AIE sur l'utilisation des carburants de rechange pour moteurs seront heureux de recevoir vos commentaires et suggestions à ce sujet. Voici mon adresse :

Direction de la technologie de l'efficacité énergétique et des
énergies de remplacement
CANMET
Énergie, Mines et Ressources Canada
580, rue Booth
Ottawa (Ontario)
Canada K1A 0E4

Téléphone : (613) 996-5965
Télécopieur : (613) 996-9416

Bernie James
Chef
Technologie des
carburants de transport

TABLE DES MATIÈRES

Page

Avant-propos ..... **iii**

Introduction ..... **v**

Résumé ..... **ix**

Glossaire des abréviations ..... **x**

I Préambule **1**

II La législation actuelle sur les émanations des gaz d'échappement **4**

III L'utilisation du méthanol en tant que carburant **11**
- A. Les mesures législatives en vigueur sur les émanations 11
- B. Activités des principaux fabricants de moteurs 14
- C. Utilisation des convertisseurs catalytiques 25
- D. Résultats des essais relatifs aux émanations 34

IV Perfectionnement de la technologie du diesel **43**
- A. Introduction 43
- B. Sommaire 44
- C. Configuration du moteur 47
- D. Le traitement ultérieur des gaz d'échappement 52
- E. La reformulation du carburant diesel 56

V L'impact de la substitution du carburant **59**
- A. Vue d'ensemble 59
- B. Les émanations réglementées 62
- C. Production du gaz carbonique 70
- D. Autres considérations 72

VI Conclusions **73**

VII Bibliographie **75**

Tableaux et graphiques

II-1 Cycles d'essai internationaux relatifs aux émanations 5

II-2 Cycles d'essai à phases transitoires pour moteurs diesel de véhicules lourds 7

II-3 Cycles d'essai à phases stables pour moteurs diesel de véhicules lourds 8

II-4 Limites permises d'émanations des gaz d'échappement, moteurs diesel de véhicules lourds, sur le plan international 9

III-1 Limites permises d'émanations des gaz d'échappement, moteurs diesel de véhicules lourds, États-Unis 12
III-2 Formule de l'équivalent en hydrocarbures de la masse organique 13
III-3 Limites de formaldéhydes proposées pour les moteurs au méthanol 13
III-4 Résultats des essais, émanations de moteurs de véhicules lourds 39
V-1 Moteurs éventuels pour autobus de transport en commun 60
V-2 Consommation des autobus canadiens de transport en commun (1986) 64
V-3 Consommation de carburant prévue par type de moteur (Vancouver) 64
V-4 Comparaison entre les émanations d'hydrocarbures (HC) 66
V-5 Comparaison entre les émanations d'oxyde de carbone (CO) 66
V-6 Comparaison entre les émanations d'oxydes d'azote 67
V-7 Comparaison entre les dégagements de particules 67
V-8 Prévisions d'émanations d'hydrocarbures (HC) 68
V-9 Prévisions d'émanations d'oxyde de carbone (CO) 68
V-10 Prévisions d'émanations d'oxydes d'azote 69
V-11 Prévisions de dégagements de particules 69
V-12 Changements prévus concernant les émanations de gaz carbonique (CO_2) en provenance des moteurs 71

Annexe

Cycle de recherche uniformisé sur les émanations 83
A. Introduction 85
B. Considérations conceptuelles 85
C. Le cycle d'essai 89
D. Les méthodes de mesure 100
E. Conclusions 102
F. Bibliographie 103

Tableaux, graphiques et figures

1 Échantillonneur à volume constant (5) 88
2 Cycle de recherche sur les émanations des moteurs au méthanol proposé par SYPHER, un seul segment 90
3 Cycle de recherche sur les émanations des moteurs au méthanol proposé par SYPHER, segments multiples 92
4 Phase idéalisée d'accélération et de conduite (9) 94
5 Pondération relative de l'essai sur les émanations des MDVL, cycle transitoire de l'EPA (3) 96
6 Profils de fonctionnement des moteurs, véh. européens (3) 98
7 Profils de fonctionnement des moteurs, véh. canadiens propulsés au méthanol (12) 99

RÉSUMÉ

L'intérêt global croissant pour la limitation de la pollution atmosphérique a conduit les législateurs de nombreux pays à imposer des règlements stricts sur les émanations des véhicules automobiles. La plupart des pays du monde ont instauré des normes à ce sujet depuis de nombreuses années, mais il existe encore beaucoup de diversité dans les solutions adoptées. Le présent document permet de comparer les règlements internationaux relatifs aux émanations, y compris les cycles d'essai, les techniques d'échantillonnage et de mesure utilisées et les limites légales relatives aux polluants. Compte tenu des nombreuses variations observées dans les critères de base et de leur application à différents types et classes de véhicules, il est pratiquement impossible d'établir des corrélations croisées entre les normes des différents pays. De plus, il est probable que toute tentative de promulgation de normes universelles se heurtera à une vive résistance car de nombreux pays ont élaboré leurs règlements en se basant uniquement sur leurs propres préoccupations environnementales et leur propre situation économique.

L'utilisation du méthanol comme carburant est désormais largement considérée comme un moyen de réduire la pollution émanant des véhicules automobiles, surtout parce que les produits de sa combustion sont exempts de suie et, dans leur ensemble, faiblement polluants. Dans ce document, nous présentons un aperçu des travaux en cours ayant trait à la conception, à la fabrication et aux essais de moteurs au méthanol pour camions et autobus ainsi qu'une vue d'ensemble sur l'utilisation des convertisseurs catalytiques pour la réduction des émanations des gaz d'échappement de ces moteurs. Nous y incluons également, aux fins de comparaison, un examen des progrès réalisés dans le domaine des mesures antipollution concernant les moteurs diesel.

Avant que l'on commence à utiliser le méthanol comme carburant de substitution au diesel, les organismes de réglementation devront veiller à sa compatibilité avec les normes existantes sur la limitation des émanations. Entre temps, les chercheurs et les fabricants doivent continuer à développer leurs moteurs. La diversité des méthodes d'essai relatives aux émanations crée un élément de confusion qui complique l'évaluation des progrès techniques réalisés en vue de réduire les émanations. Ce problème est aggravé par la tendance à concevoir les moteurs modernes en fonction de leur fabrication et de leur commercialisation sur une base internationale. Tout effort visant à une plus grande uniformité entre les cycles d'essai sur les émanations serait donc bien accueilli, tant par les chercheurs autonomes que par les fabricants de moteurs. Ce rapport se termine par une proposition visant à mettre au point un cycle de recherche uniformisé sur les émanations. Le cycle proposé pourrait servir à faciliter les comparaisons entre les nombreuses stratégies de limitation des émanations présentement à l'étude.

GLOSSAIRE DES ABRÉVIATIONS

APMH	Avant point mort haut
CCPF	Consommation de carburant en fonction de la puissance au frein
CCV	Consommation de carburant du véhicule
CEE	Communauté économique européenne
CFC	Chlorofluorocarbure
CL	Camionnette
CO	Oxyde de carbone
CO_2	Gaz carbonique
CSC	Consommation spécifique de carburant
CVS	Constant volume sampling (échantillonnage à volume constant)
DDC	Detroit Diesel Corporation
DDEC	Système de commande électronique Detroit Diesel
DEESEE	Détermination des émanations évaporatives sous enveloppe étanche (É.-U)
DIF	Détecteur d'ionisation de flammes
Eevap	Émanations évaporatives
EHMO	Équivalent en hydrocarbures de la masse organique
EPA	Environmental Protection Agency (organisme américain de protection de l'environnement)
FEV	FEV Ltd.
FP	Facteur de pollution
HC	Hydrocarbures
ICI	Imperial Chemical Industries
ID	Injection directe
MAN	Maschinenfabrik Augsberg-Nurnberg
MDVL	Moteur diesel de véhicule lourd
MEVL	Moteur à essence de véhicule lourd
MPMP	Méthanol pour moteurs puissants (Canada)
MV1	Numéro d'identification de l'autobus d'essai de l'Institut de recherche automobile du Japon

NGK	NGK Insulators Ltd.
NSaldPF	Niveau spécifique d'aldéhyde en fonction de la puissance au frein
NSCOPF	Niveau spécifique d'oxyde de carbone en fonction de la puissance au frein
NSformPF	Niveau spécifique de formaldéhyde en fonction de la puissance au frein
NSHCPF	Niveau spécifique d'hydrocarbures en fonction de la puissance au frein
NSOAPF	Niveau spécifique d'oxydes d'azote en fonction de la puissance au frein
NSPPF	Niveau spécifique de particules en fonction de la puissance au frein
OA	Oxydes d'azote
PEEC	Système programmable de commande élctronique du moteur (Caterpillar)
PNBV	Poids nominal brut du véhicule
RTS	Modèle d'autobus fabriqué par Transportation Manufacturing Corporation (TMC)
VGN	Véhicule propulsé au gaz naturel
VL	Véhicule léger

I PRÉAMBULE

Le public se préoccupe de plus en plus de la qualité de l'environnement dans lequel nous vivons actuellement. Cette préoccupation a amené les législateurs à adopter des mesures limitant l'utilisation ou le dégagement de substances jugées toxiques ou nocives pour l'humanité et l'environnement. Les émanations des gaz d'échappement des véhicules constituent l'une des sources de pollution qui a été et continue d'être étudiée et réglementée. La préoccupation générale au sujet de la pollution par les véhicules automobiles va devenir un problème qui prendra de l'ampleur dans la mesure où le nombre de véhicules automobiles en circulation va continuer à augmenter, en particulier dans les pays en développement.

En Amérique du Nord, en Europe de l'Ouest et au Japon, la demande d'automobiles est demeurée relativement stable au cours des dernières années et ne devrait augmenter que de l'ordre de 20 % pendant la prochaine décennie. Mais dans le reste du monde, on prévoit que la demande augmentera de 75 % (1). On peut attribuer cette croissance au développement et à la modernisation en cours dans le reste du monde, conjointement à l'augmentation de la richesse nette. En conséquence, on peut s'attendre à une augmentation du volume global des émanations.

L'augmentation prévue du nombre global de moteurs va accroître notre dépendance actuelle vis-à-vis des combustibles à base d'hydrocarbures (essence et diesel) et mettre l'accent sur la nécessité de limiter plus étroitement les quantités de polluants dégagés par moteur. Les futures réductions des émanations nocives seront dues à deux facteurs : les limites imposées par les législateurs sur les émanations en termes de débit spécifique par moteur, et les améliorations technologiques apportées par les fabricants telles que les commandes électroniques des moteurs, les nouveaux matériaux, les catalyseurs de gaz d'échappement et les carburants de rechange. Ce sont les limites imposées par les législateurs sur les émanations des gaz d'échappement et la consommation moyenne de carburant par les parcs de véhicules qui ont provoqué les nombreuses améliorations technologiques réalisées jusqu'à ce jour dans les pays développés.

La plupart des essais relatifs aux émanations effectués par les fabricants et créateurs de moteurs sont réalisés dans le contexte de la conformité aux règlements sur les émanations des gaz d'échappement du marché-cible du moteur. Les règlements sur les émanations touchent les hydrocarbures (HC), l'oxyde de carbone (CO) et les oxydes d'azote (OA). Certains pays ou régions limitent les dégagements de fumée ou de particules des moteurs diesel dans leur zone de compétence. En plus des émanations réglementées, la concentration globale de gaz carbonique (CO_2) a fait l'objet au cours de la dernière année d'une vaste polémique dans le public. De plus en plus, les fabricants et les créateurs de moteurs, de concert avec les législateurs, devront se préoccuper de toutes les émanations des gaz d'échappement.

Le présent rapport a trait aux émanations des moteurs diesel de véhicules lourds et aux règlements les concernant. La section II du rapport traite du rôle que peuvent jouer les législateurs dans le contrôle ou la limitation des émanations des gaz d'échappement. Bien que, globalement, on observe une tendance à l'adoption de normes encore plus strictes sur les émanations de cette catégorie de moteurs, la démarche des États-Unis et du Canada diffère de celle de l'Europe ou du Japon. La section III a trait au méthanol en tant que carburant de transport potentiel pour les fabricants désireux de produire des moteurs capables de satisfaire les futures normes sur les émanations des moteurs diesel de véhicules lourds, en particulier les normes de l'organisme américain de protection de l'environnement (EPA) qui entreront en vigueur en 1991 et 1994. Dans la sous-section IIIA, nous passons en revue l'à propos et l'application des lois actuelles sur les émanations aux moteurs au méthanol. La sous-section IIIB est un résumé des activités des principaux fabricants internationaux touchant le développement des moteurs au méthanol de véhicules lourds et des programmes connexes d'essai en parcs de véhicules. Compte tenu de l'intérêt croissant pour les moteurs à alcool de véhicules lourds, nous nous sommes surtout intéressés à l'utilisation des catalyseurs pour la limitation des émanations des gaz d'échappement. La sous-section IIIC résume les travaux récents réalisés en ce domaine. La sous-section IIID complète le tour d'horizon concernant les travaux relatifs au méthanol en présentant certains résultats représentatifs des essais touchant les émanations des gaz d'échappement des moteurs. Les essais ont généralement été effectués conformément aux règlements locaux sur les émanations. Nous exposons des méthodes de corrélation potentielle des données obtenues par les diverses méthodes d'essai.

La section IV est une vue d'ensemble des problèmes auxquels sont actuellement confrontés les moteurs alimentés au carburant diesel et des technologies qui devraient leur permettre de respecter les normes de 1991 et de 1994 établies par l'EPA. Un progrés très sensible est évident en ce domaine. Le recours aux carburants à faible teneur en soufre, aux pièges à particules et aux systèmes d'injection perfectionnés ont permis aux fabricants d'obtenir les réductions d'émanations nécessaires. On s'attend maintenant à ce que des moteurs diesel offrant ces perfectionnements soient disponibles en production courante en 1994.

La section V a trait à l'effet réel exercé sur les émanations par la substitution de différentes sortes de carburants. On présente normalement les émanations des moteurs de véhicules lourds sur une base de débit spécifique en fonction de la puissance (par ex., en grammes/unité de puissance au frein/heure). Mais ce genre de critère ne rend pas bien compte du mode de fonctionnement réel des véhicules. Nous présentons des comparaisons entre les émanations sur route provenant d'autobus urbains propulsés au diesel, au diesel avec piège à particules, au méthanol et au gaz naturel, dans le but d'exposer sommairement l'effet pratique véritable de la conversion des moteurs diesel à divers carburants de substitution.

II LA LÉGISLATION ACTUELLE SUR LES ÉMANATIONS DES GAZ D'ÉCHAPPEMENT

Il existe beaucoup de diversité dans la manière de réglementer les émanations des gaz d'échappement des véhicules. Cela est dû au fait que les règlements en ce sens résultent d'un équilibre entre les préoccupations relatives à la qualité de l'air et les préoccupations d'ordre économique touchant une région donnée. En conséquence, on a assisté à l'adoption d'une grande variété de normes sur les émanations, chacune de ces normes répondant aux besoins d'une région géopolitique distincte. Il y a eu certes un effort d'uniformisation de ces règlements, mais, à ce jour, cet effort a largement été confiné aux régions qui se sont associées sur le plan économique. Le Canada et les États-Unis sont un exemple de ce phénomène puisque le Canada envisage l'adoption d'une législation s'alignant sur celle des États-Unis. On peut aussi citer le cas de la Communauté économique européenne, qui a établi une norme minimale pour ses pays membres tout en laissant à chacun d'eux la possibilité d'adopter des règlements plus stricts. Dans ces deux cas, l'effet net de l'uniformisation des règlements a été de permettre aux fabricants d'exporter leurs produits sans avoir à les soumettre à d'autres essais ou à d'autres processus d'homologation pour satisfaire d'autres normes. Potentiellement, l'uniformisation des normes permet aux fabricants de réduire leurs coûts de développement et de production.

On peut subdiviser les règlements sur les émanations en trois domaines spécifiques (2) :

- le cycle de conduite ou d'essai;
- la méthode de prélèvement et de mesure des échantillons;
- les limites permises, leur applicabilité et les exemptions ou renonciations.

Selon les règlements adoptés dans un domaine donné, on peut obtenir de nombreuses combinaisons différentes. Certains pays peuvent par exemple adopter le même cycle d'essai, mais diminuer ou augmenter les niveaux d'émanations permis par rapport à d'autres régions. Le tableau II-1 présente une matrice des cycles d'essai pratiqués dans l'ensemble du monde. Notons cependant que, même dans ce tableau, il est difficile de faire entrer un véhicule ou un moteur dans une catégorie parfaitement définie selon des critères

uniformes. Les catégories de véhicules ou de moteurs ont été élaborées uniquement en fonction du pays ou de la région.

Tableau II-1. Cycles d'essai internationaux relatifs aux émanations

PAYS	VL	CL	MEVL	MDVL	Eevap.
États-Unis	CVS-75	CVS-75	EPA HDG Transitoire	MDVL EPA Transitoire	DEESEE
Canada	CVS-75	CVS-75	Comme aux É.-U.	Comme aux É.-U.	DEESEE
Japon	10 MODES	10 MODES (3, 5)	6 MODES (5)	6 MODES (5)	PIÈGE
Europe	CEE 15,04			CEE-49 (5)	
Autriche	CVS-75			CEE-49 (5)	
Suède	CVS-72 (2)				
Suisse	CVS-75	CVS-75	CEE-49 (4, 5)	CEE-49 (4, 5)	
Australie	CVS-75	CVS-75			DEESEE
Israël, Arabie Saoudite, Singapour, Taïwan	CEE-15,03 (6)				DEESEE (7)

N.B. : VL = Véhicule léger ou voiture particulière
CL = Camionnette
MEVL = Moteur à essence de véhicule lourd
MDVL = Moteur diesel de véhicule lourd
Eevap. = Émanations évaporatives

(1) Données de 1990
(2) Essence seulement
(3) Essai à 6 modes sur moteur Diesel
(4) Pour tous les véhicules à PNBV de 3 500 à 28 000 kg
(5) Essai du moteur au dynamomètre
(6) Véhicules propulsés à l'essence à PNBV inférieur à 3 500 kg
(7) Véhicules à essence en Arabie Saoudite
(8) La CEE (Communauté économique européenne) comprend les pays suivants : Belgique, Danemark, France, Espagne, Grèce, Irlande, Italie, Luxembourg, Pays-Bas, Portugal, Allemagne et Royaume-Uni

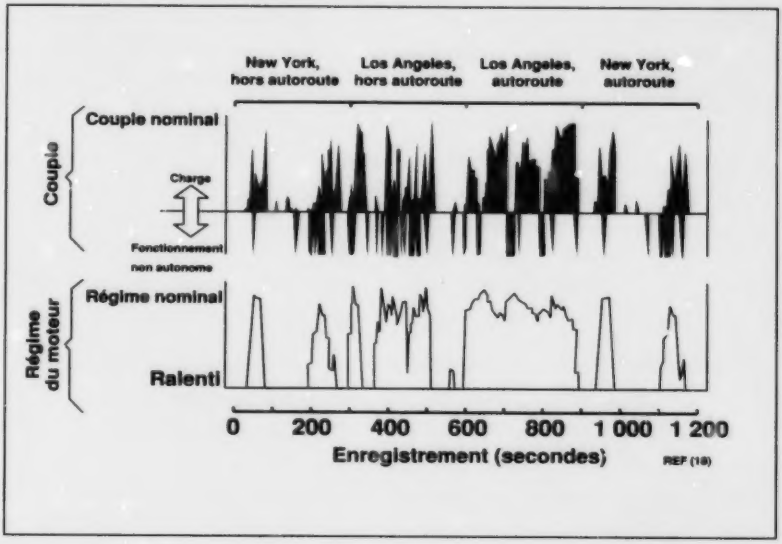
En se basant sur la matrice, on constate que les cycles d'essai utilisés dérivent de l'un des deux principes suivants : série de répétitions de modes composites typiques de conduite de véhicules légers (Europe et Japon), ou simulation d'un parcours réel sur route (États-Unis et Canada). Dans le cas des moteurs de véhicules lourds, tous les pays énumérés, sauf le Canada et les États-Unis pratiquent des essais multimodaux à phases stables pour mesurer les émanations. Le recours aux cycles de conduite composites ou aux essais multimodaux à régimes stables constitua la solution initiale jusqu'à l'adoption

par les États-Unis en 1972 de l'essai CVS-72 (essai d'échantillonnage à volume constant de 1972, que l'on appelle aussi "méthode d'essai fédérale"). Cet essai a été révisé en 1975 pour y inclure une phase de démarrage à chaud et une répétition des 505 premières secondes du cycle de conduite à froid. En 1985, l'essai à 13 modes a été remplacé aux États-Unis par un cycle à phases transitoires. Depuis cette date, le Canada a adopté une mesure similaire. La raison d'être de ce changement était de créer un cycle d'essai plus représentatif des nombreux aspects de la conduite normale d'un véhicule. Contrairement aux essais en modes composites, un cycle à phases transitoires consiste en changements continuels de vitesses et de charges au moteur de façon à simuler le genre d'utilisation type auquel pourraient être soumis les véhicules d'une catégorie donnée. On peut donc dire qu'un cycle à phases transitoires est constitué d'une série de points décrivant la vitesse du moteur et sa charge pendant une période donnée. Dans une des section suivantes, nous présenterons une comparaison plus explicite entre l'essai à phases transitoires et l'essai à phases stables.

Alors que les cycles d'essai touchant les camionnettes et véhicules légers sont basés sur des essais dynamométriques sur châssis, la méthode d'essai touchant les moteurs des véhicules lourds varie quelque peu. Le cycle d'essai à phases transitoires pratiqué aux États-Unis nécessite le recours à des essais du moteur au dynamomètre. Le cycle d'essai a été mis au point en combinant les aspects de la conduite en ville et sur route. On peut diviser le cycle d'essai à phases transitoires du moteur diesel en quatre segments discrets : New York hors autoroute, Los Angeles hors autoroute, Los Angeles autoroute et New York autoroute. Le graphique II-2 est une représentation du cycle en question. La vitesse du moteur et sa charge sont basées sur des valeurs normalisées. On utilise des programmes d'essai dynamométrique distincts pour les moteurs à essence de véhicules lourds en raison des différences de leurs caractéristiques couple-vitesse avec celles des moteurs diesel. Les fabricants de moteurs doivent faire homologuer leurs moteurs de véhicules lourds en leur faisant subir des essais au dynamomètre conformes au programme vitesse-charge prescrit par l'EPA, qui comporte des périodes de fonctionnement non autonome du moteur représentées par des périodes de puissance négative. Les phases de fonctionnement non autonome servent à simuler la décélération qui se produit lorsque le moteur agit par inertie. Bien qu'il existe une méthode d'essai à phases transitoires relative aux émanations des véhicules lourds à l'aide d'un

dynamomètre de châssis, cette méthode n'est pas reconnue par l'EPA aux fins des essais réglementaires pour le moment.

Grapique II-2. Cycles d'essai à phases transitoires pour moteurs diesel de véhicules lourds



Le cycle d'essai américain à phases transitoires remplace l'essai à 13 modes lors des épreuves de conformité aux règlements aux États-Unis et au Canada. L'essai à 13 modes est un essai à phases stables qui permet d'évaluer les émanations du moteur d'après une moyenne pondérée de 13 points. L'essai à phases stables est encore utilisé en Europe et au Japon. Le tableau II-3 résume ces cycles d'essai. Ces trois cycles sont basés sur des essais du moteur, bien que la méthode japonaise à 6 modes pour moteurs diesel de véhicules lourds puisse être effectuée sur dynamomètre de châssis aux fins de conformité aux normes sur les émanations.

Si l'on effectue des essais touchant les moteurs diesel de véhicules lourds, c'est à cause des applications très diverses auxquelles ils peuvent être destinés. Contrairement aux automobiles, les camions et autobus sont fabriqués selon les spécifications de l'acheteur relativement au moteur, à la boîte de vitesses, au rapport de pont, aux pneus, etc. S'il fallait pratiquer les essais sur les véhicules lourds, cela occasionnerait des embouteillages inutiles et des coûts

supplémentaires, particulièrement si l'installation d'essai devait effectuer un essai sur châssis à phases transitoires.

Tableau II-3. Cycles d'essai à phases stables pour moteurs diesel de véhicules lourds

	13-MODES : É.-U. (1)			CEE 49			6-MODES : JAPON		
MODE	RÉGIME	CHARGE (%)	POIDS	RÉGIME	CHARGE (%)	POIDS	RÉGIME	CHARGE (%)	POIDS
1	Ral. réduit	0	$^{0,2}/_{3}$	Ral. réduit	0	$^{0,25}/3$	Ralenti	0	0,355
2	Int.	2	0,08	Int.	10	0,08	40% rég. nom.	100	0,071
3	Int.	25	0,08	Int.	25	0,08	50% rég. nom.	25	0,059
4	Int.	50	0,08	Int.	50	0,08	60% rég. nom.	100	0,107
5	Int.	75	0,08	Int.	75	0,25	80% rég. nom.	25	0,286
6	Int.	100	0,08	Int.	100	0,25	80% rég. nom.	75	0,286
7	Ral. réduit	0	$^{0,2}/_{3}$	Ral. réduit	0	$^{0,25}/3$			
8	Nominal	100	0,08	Nominal	100	0,10			
9	Nominal	75	0,08	Nominal	75	0,02			
10	Nominal	50	0,08	Nominal	50	0,02			
11	Nominal	25	0,08	Nominal	25	0,02			
12	Nominal	2	0,08	Nominal	10	0,02			
13	Ral. réduit	0	$^{0,2}/_{3}$	Ral. réduit	0	$^{0,25}/3$			

Lorsque l'on compare les cycles, on peut soutenir que le cycle d'essai à phases transitoires est constitué de nombreux points stables, mais il faut tenir compte de différences discrètes. Théoriquement, il est possible d'élaborer une carte à points stables des émanations d'un moteur et de s'en servir pour prédire les résultats que l'on pourrait obtenir en cycle à phases transitoires. Cependant, lorsqu'on essaie d'établir une corrélation entre les données relatives aux émanations du cycle à phases stables et celles du cycle à phases transitoires, on doit tenir compte de l'effet produit par deux groupes de facteurs : la configuration du moteur et le cycle d'essai. Par exemple, un composant tel que le turbocompresseur, dont la réaction est de type transitoire, exerce un effet sur le profil des émanations d'un moteur lorsqu'il subit un essai en cycle à phases transitoires qui comporte de fréquents changements de puissance et de vitesse.

Sur les plans du prélèvement et de la mesure des émanations, on s'attend à ce que les règlements législatifs évoluent dans le sens d'une plus grande uniformisation des méthodes d'échantillonnage et des techniques de mesure (2).

Le domaine où peut subsister une différence importante dans les règlements sur les émanations est celui des limites permises. Le tableau II-4 présente certaines limites actuellement en vigueur relativement aux moteurs diesel de véhicules lourds. On ne peut comparer ligne à ligne l'efficacité d'ensemble des mesures adoptées que si l'on connaît le cycle d'essai et les techniques d'échantillonnage et de mesure utilisés. On peut cependant comparer l'effet net des mesures législatives sur les émanations adoptées par différents pays ou régions en générant un modèle de l'effet net des mesures législatives à partir d'un cas de base.

Tableaut II-4. Limites permises d'émanations des gaz d'échappement, moteurs diesel de véhicules lourds, sur le plan international

Pays	Unités	HC	CO	OA	Particules
É.-U. (5)	g/kW/h	1,7	20,8	8,0	0,8
Canada (6)	g/kW/h	1,7	20,8	8,0	0,8
Japon (2)	ppm	670	980	520	
Europe (3)	g/kW/h	2,4	11,2	14,4	
Autriche (3)	g/kW/h	2,8	11,2	14,4	
Suisse	g/kW/h	2,1	8,4	14,4	

Réf. : (4, 7, 8)

N.B. : (1) Données de 1990
(2) Pour véhicules à mot. diesel à PNBV > 2 500 kg; à compter d'avril 1991 pour les véhicules importés
(3) Pour les véhicules à PNBV > 3 500 kg
(4) Pour les véhicules à PNBV > 28 000 kg
(5) Les données des États-Unis ont été converties à partir des données publiées en g/HP au frein/h
(6) Les données canadiennes ont été converties à partir des données publiées en g/MJ

Il est possible de limiter et ensuite de réduire de nombreuses façons les émanations polluantes des gaz d'échappement, c'est pourquoi les observations qui précèdent ne servent nullement à approuver une méthode particulière. Bien que la solution adoptée par les États-Unis soit généralement considérée comme la plus stricte, les autres pays se préoccupent de plus en plus de la pollution engendrée par les gaz d'échappement, ce qui en a incité beaucoup à adopter graduellement certaines formes de réglementation sur les émanations et d'autres à en abaisser les limites permises. La sensibilisation accrue des Européens aux émanations les a conduit a prescrire des niveaux d'émanations plus réduits de sorte que l'effet des émanations sur l'environnement européen soit équivalent à celui produit par les normes américaines (9).

III L'UTILISATION DU MÉTHANOL EN TANT QUE CARBURANT

A. LES MESURES LÉGISLATIVES EN VIGUEUR SUR LES ÉMANATIONS

Les lois actuelles sur les émanations s'appliquent aux moteurs alimentés à l'essence et au carburant diesel. Cetains pays ont étendu leurs règlements de façon à ce qu'ils s'appliquent aussi aux véhicules équipés de moteurs alimentés au gaz naturel ou au propane. Les fabricants qui souhaitent vendre leurs moteurs de véhicules lourds aux États-Unis doivent aussi tenir compte des normes sur les autobus urbains qui entreront en vigueur en 1991 et des normes sur les oxydes d'azote et les particules qui entreront en vigueur en 1994. Ces normes sont présentées au tableau III-1. Le problème peut-être le plus difficile à résoudre est celui qui touche la réduction des concentrations de particules lors du cycle d'essai à phases transitoires. Les nouveaux règlements qui entreront en vigueur en 1991 visent les autobus urbains car ces véhicules constituent une source de pollution facile à repérer par le public. En conséquence, les fabricants de moteurs diesel de véhicules lourds tels que Detroit Diesel Corporation, Caterpillar Inc., Cummins, MAN, Daimler Benz et d'autres ont commencé à considérer le méthanol comme un carburant de rechange susceptible de satisfaire les futures normes relatives aux émanations. Bien que l'on ait toujours pensé qu'un carburant de rechange type devait être un substitut du pétrole, le méthanol s'avère prometteur sur le marché américain des carburants en raison de ses faibles niveaux d'émanations polluantes.

En réaction aux demandes exprimées par les fabricants de moteurs visant l'élaboration de "règles du jeu" concernant les moteurs au méthanol, les gouvernements des États-Unis et de l'État de Californie ont élargi leurs règlements existants sur les émanations pour qu'ils s'appliquent aussi aux moteurs au méthanol. Les règlements en question traitent les moteurs au méthanol de la même façon que les moteurs à essence ou au carburant diesel (5). Cette solution s'accorde bien avec le souci de "jouer franc jeu", c'est-à-dire de n'écarter aucun carburant particulier.

Bien que les règlements sur les émanations relatifs au méthanol devaient s'appliquer aux véhicules fabriqués en 1990, L'EPA a reporté à 1991 la date de début de conformité.

Tableau III-1. Limites permises d'émanations des gaz d'échappement, moteurs diesel de véhicules lourds, États-Unis

Année	Unités	HC	CO	OA	Particules
1991-1993	g/kW/h	1,7	20,78	6,70 0,13 (1)	0,34
1994 +	g/kW/h	1,7	20,78	6,70	0,13 (2)

N.B. : (1) Applicable aux moteurs d'autobus urbains
(2) Tous les moteurs
(3) La Californie permet aux fabricants de faire homologuer des moteurs dont les émanations d'hydrocarbures autres que le méthane ne dépassent pas 1,6 g/kW/h

Tous les chiffres ont été convertis à partir de données en g/HP au frein /h

Les règlements révisés des États-Unis sur les émanations des moteurs au méthanol conservent le cycle d'essai de base ainsi que la méthode d'échantillonnage et de mesure des émanations réglementées. Les normes comprennent maintenant des détails relatifs aux méthodes d'échantillonnage, de mesure et de quantification des aldéhydes et du carburant imbrûlé en vue de l'homologation des moteurs au méthanol. Pour permettre d'intégrer les moteurs au méthanol dans les catégories existantes des règlements actuels relatifs aux moteurs diesel et à essence, on soumet les moteurs au méthanol à des vérifications selon les critères suivants : si le moteur au méthanol fonctionne en cycle Otto, il est soumis aux mêmes règles que les moteurs à essence (à allumage par étincelle); s'il fonctionne en cycle diesel (allumage par compression), le moteur est soumis aux mêmes règles qu'un moteur diesel. Les normes font appel à la somme pondérée des hydrocarbures, des aldéhydes et du carburant imbrûlé mesurée d'après les normes existantes sur les hydrocarbures. De cette façon, le potentiel de production d'ozone des véhicules propulsés au méthanol n'est pas plus limité que celui des véhicules actuels. Autrement dit, sur le plan des hydrocarbures, on ne traite pas les moteurs au méthanol différemment des moteurs à essence ou diesel. Les hydrocarbures totaux sont indiqués sous forme d'équivalent en hydrocarbures de la masse organique (EHMO) que l'on calcule d'après les formules du tableau III-2.

Les règles qui ont récemment été adoptées par la Air Resources Board (Commission des ressources atmosphériques) de Californie incluent les règles

du gouvernement fédéral des États-Unis, mais y ajoutent une norme distincte sur les émanations d'aldéhydes, car on s'attend à ce que l'utilisation accrue du méthanol en tant que carburant de transport fasse grimper les émanations d'aldéhydes, donc la production d'ozone. Le tableau III-3 résume les limites proposées aux émanations de formaldéhyde des moteurs de véhicules lourds vendus en Californie. La Air Resource Board de Californie croit aussi que les émanations d'aldéhydes produisent des effets toxiques (11).

Tableau III-2. Formule de l'équivalent en hydrocarbures de la masse organique

$$EHMO = HC + \frac{13.8756}{32,042}(CH_3OH) + \frac{13.8756}{30,0262}(HCHO)$$

où : HC = masse d'hydrocarbures

CH_3OH = masse de méthanol (carburant non brûlé)

HCHO = masse de formaldéhyde

13,876 représente le poids moléculaire des HC courants du véhicule

32,042 représente le poids moléculaire du méthanol

30,0262 représente le poids moléculaire du formaldéhyde

Émanations évaporatives totales =

$$\left(M_{HC} + \frac{14.3594E6 * M_{CH3OH}}{32,042}\right) + \left(M_{HC} + \frac{14.2284E6 * M_{CH3OH}}{32,042}\right)$$

où : M_{HC} = changement en grammes de la masse d'hydrocarbures

M_{CH3OH} = changement en microgrammes de la masse de méthanol

14,3594 = représente le poids moléculaire des HC (essai diurne)

14,2284 = représente le poids moléculaire des HC (trempe à chaud)

Tableau III-3. Limites de formaldéhyde proposées pour les moteurs au méthanol de véhicules lourds, Californie

ANNÉE DE FABRICATION	LIMITE DE FORMALDÉHYDE g/kW/h
1993-1995	0,13
1996	0,07

Réf. (56)

N.B. : (1) Les limites de formaldéhyde ont été converties à partir de données en g/HP/h

(2) S'appliquent aux moteurs Otto et diesel

B. ACTIVITÉS DES PRINCIPAUX FABRICANTS DE MOTEURS

Cummins Engine Co.

Cummins Engine Co. s'est servie de son moteur L 10 pour poids moyen et autobus afin d'étudier l'enrichissement du méthanol à l'aide d'un additif. C'est à la société ORTECH International qu'ont été confiés les essais de rendement, d'endurance et d'analyse des taux d'émanations sur les moteurs expérimentaux. ORTECH devait également étudier les effets des variations dans les proportions d'additifs destinés à faciliter l'allumage. À cette fin, elle utilisa l'additif Avocet produit par Imperial Chemical Industries (ICI), à la concentration de 5 %.

Deux camions équipés de moteurs L 10 au méthanol furent utilisés par la ville de Vancouver dans le cadre du projet MPMP. Ces camions, qui servaient au ramassage des déchets industriels, étaient munis d'une benne à mécanisme de compactage et d'une pompe hydraulique entraînée par prise de force destinée à faire fonctionner les mécanismes de chargement et de compactage des déchets. Le premier camion, équipé d'un moteur d'une puissance nominale au frein de 270 hp à 2 100 tr/min, entra en service en mars 1988. Le second, qui entra en service en février 1989, était équipé d'un moteur d'une puissance au frein de 240 hp. En raison de sa puissance nominale, ce dernier type de moteur était principalement destiné au marché des autobus de transport en commun. La période d'essai se termina en août 1990. À cette date, les deux camions avaient parcouru une distance combinée de 51 000 km. Sur une base comparative, la consommation énergétique de ces deux camions, se révéla satisfaisante, c'est-à-dire à peu près égale à celle des camions équipés de moteurs Diesel.

La société Cummins a également installé un autre moteur L 10 d'une puissance au frein de 240 hp sur un camion à benne basculante appartenant à la ville de Los Angeles. Ce véhicule, mis en service en mai 1989, est également alimenté par le mélange constitué de méthanol et de 5 % d'Avocet qui était utilisé au Canada.

Les travaux de mise au point du moteur au méthanol qui se sont poursuivis ont porté principalement sur la régulation et les caractéristiques de l'injection, y compris sur le procédé de calage variable de l'injection. Les essais effectués sur les moteurs avec différentes concentrations d'Avocet firent ressortir certains effets compensatoires relativement aux émanations. Par exemple, en abaissant

la concentration d'Avocet, on augmentait les émanations d'hydrocarbures (HC), leur combustion étant moins complète. Par contre, lorsqu'on augmentait la concentration d'Avocet pour améliorer le taux de combustion, les émanations d'oxydes d'azote tendaient à augmenter. Étant donné qu'actuellement l'Avocet coûte cher, il est souhaitable d'en réduire la concentration. C'est pourquoi Cummins a étudié le traitement catalytique des émanations de manière à utiliser moins d'additif. Cummins a également étudié l'allumage par bougie de préchauffage, mais a décidé de ne pas entreprendre, pour le moment, d'essais à ce sujet sur des véhicules en service.

Caterpillar Incorporated

La société Caterpillar a converti au méthanol deux de ses modèles de moteurs diesel, les modèles 3306 et 3406. Il s'agit de moteurs à 6 cylindres pour poids lourds, à cylindrée de 10,5 et de 14,6 litres respectivement. Ces deux types de moteurs ont été soumis à des programmes d'essai de longue durée afin d'en déterminer la fiabilité, la durabilité et la consommation de carburant. Deux moteurs 3406, montés sur des camions de transport routier utilisés en Colombie-Britannique (projet MPMP), ont parcouru une distance totale combinée de plus de 500 000 km en 1988 et 1989. Les moteurs Caterpillar au méthanol sont dotés de bougies de préchauffage modulés pour l'allumage. Le carburant est composé à 99,96 % de méthanol pur et à 0,04 % d'un inhibiteur de corrosion destiné à protéger le système d'alimentation en carburant. À la fin de 1989, les deux moteurs ayant servi au projet MPMP ont été déposés et expédiés chez Caterpillar pour y être démontés et inspectés. Les essais à phases transitoires relatifs aux émanations de l'un des moteurs pour en vérifier la conformité aux normes de l'EPA démontrèrent que les émanations avaient peu augmenté depuis sa mise en service et que les concentrations d'hydrocarbures s'étaient légèrement améliorées en raison du bon rodage subi par le moteur en parcourant 240 000 km. Les moteurs présentaient les mêmes taux d'usure que des moteurs diesel ayant parcouru la même distance, à cette différence près que la durée de vie utile des sièges et des têtes de soupapes était d'environ 150 000 km. L'usure de l'alésage des cylindres était beaucoup moins prononcée qu'elle ne l'aurait généralement été dans un moteur diesel.

La société Caterpillar participe à un autre essai en parc de camions à Glendale, en Californie, où elle a monté un moteur 3306 au méthanol sur un camion de ramassage des déchets dans le cadre d'un programme parrainé par la

Commission de l'énergie de la Californie. Ce véhicule est entré en service à l'automne 1989.

MAN

Des autobus MAN équipés de moteurs au méthanol D2566 de 11,4 litres, à 6 cylindres, ont été utilisés à des fins d'essai en Nouvelle-Zélande, en Allemagne et aux États-Unis. Les moteurs au méthanol sont dotés de bougies pour l'allumage (12, 13, 14) et l'on se sert d'Avocet comme additif. MAN a opté pour le système d'allumage par étincelle il y a quatre ans.

Un autobus MAN fit partie des deux autobus originaux alimentés au méthanol qui furent utilisés par les services de transport en commun Golden Gate à San Francisco aux États-Unis. Cet autobus était entré en service plus de cinq ans auparavant, mais non de manière continue (15,16). Comme ce véhicule n'était pas équipé de moyens d'accès pour les personnes handicapées, il fut soumis à des restrictions d'exploitation, ce qui se répercuta sur la distance parcourue. Dix autobus MAN furent exploités par les services de transport en commun de Seattle, dans l'État de Washington, à la fin de 1987. Ces autobus parcoururent chacun une distance de plus de 60 000 km (16,17). La courte durée de vie utile des bougies d'allumage présenta un important problème; d'autre part, les véhicules eurent tendance à nécessiter plus d'entretien que les véhicules semblables à moteur diesel. Au début de 1990, les services de transport en commun de Seattle décidèrent de retirer progressivement du service les moteurs au méthanol en raison de leur coût d'entretien élevé. Cinq des dix moteurs d'autobus alimentés au méthanol ont été reconvertis au carburant diesel.

Klockner-Humboldt-Deutz

Deutz a mis au point une version alimentée au méthanol de son moteur diesel F8L413F refroidi à l'air. Ce type de moteur a été mis à l'essai en service courant, notamment sur un autobus et trois camions de ramassage des déchets exploités dans la ville de Cologne (18).

Un moteur Deutz similaire fonctionnant au méthanol a été utilisé aux fins d'essai dans une exploitation minière souterraine par la Ontario Research Foundation (devenue ORTECH International) (19). Ce moteur, que l'on équipa

d'un convertisseur catalytique à oxydation, donna des résultats améliorés en termes de qualité des gaz d'échappement par rapport à ceux d'un moteur diesel utilisé de la même façon. Les modifications ultérieures visant à en améliorer le rendement d'ensemble du moteur et à en diminuer les émanations permirent à Deutz de se dispenser de tout traitement subséquent des gaz d'échappement (20). De concert avec la plupart des autres fabricants, Deutz déclare que les très faibles concentrations de particules autorisées par les normes américaines nécessitent une limitation attentive de la consommation d'huile des moteurs.

Hino Motors Limited

La société Hino a fabriqué une version alimentée au méthanol, à allumage par étincelle, de son moteur diesel de 9,88 litres, à 6 cylindres et injection directe (21). Ce moteur, qui est destiné à équiper un autobus de transport urbain, est doté d'un convertisseur catalytique à oxydation et d'un dispositif de recyclage des gaz d'échappement (RGE). Le dispositif RGE vise à faciliter l'auto-allumage du carburant en augmentant la température interne des cylindres lorsque la charge et la vitesse le permettent. Il devient ainsi possible de faire fonctionner le moteur en recourant à l'allumage par étincelle ou à l'auto-allumage assisté par le dispositif RGE. Chacun des modes d'allumage produit des effets particuliers sur les caractéristiques des émanations des gaz d'échappement. Les recherches en cours visent à explorer les mérites relatifs de chaque mode. Ce type de moteur n'a pas encore été installé sur un véhicule en service.

Volvo

La société Volvo travaille depuis plus de dix ans à la mise au point d'une version alimentée à l'alcool de son moteur TD100. Ce moteur, doté d'un système d'allumage par préinjection de carburant diesel, permet de consommer jusqu'à 80 % d'alcool au lieu de carburant diesel en conduite normale. C'est en Suède, sur deux camions exploités par une papeterie de la ville d'Ornskoldsvik, qu'ont été effectués les essais en parc de véhicules les plus remarquables. Ces camions, alimentés à l'éthanol et au carburant diesel en préinjection, ont été utilisés pendant plus de quatre ans et ont parcouru une distance combinée dépassant 100 000 km en présentant des niveaux satisfaisants de fiabilité et de rendement (22, 23, 24). Plus tard, Volvo a remplacé la charge de préinjection par un mélange d'alcool et d'accélérateur d'allumage, ce qui lui a permis d'éliminer complètement le recours au carburant diesel.

Navistar International

Navistar a mis au point une version au méthanol de son moteur diesel DT-466 à 6 cylindres. Ce moteur de 7,64 litres équipe normalement des camions de poids moyen et développe des puissances nominales au frein allant de 165 à 245 hp. Lorsque le moteur fonctionne au méthanol, l'injection est de type direct et l'allumage bénéficie de la présence de surfaces chaudes dues aux bougies de préchauffage. Les essais ont démontré que les émanations de gaz d'échappement réglementées étaient beaucoup plus faibles que celles du moteur diesel original et qu'elles s'approchaient des normes prescrites par l'EPA pour 1994. Par ailleurs, la puissance et l'efficacité de ce moteur sont très voisines de celles du moteur diesel équivalent. Navistar a obtenu ces résultats à l'aide du carburant M85 et prévoit que les études ultérieures permettront de réduire encore davantage les concentrations de polluants dans les gaz d'échappement (25). Le moteur a subi récemment des essais de durabilité en vue de le préparer au montage sur un camion à benne basculante qui sera exploité par la ville de South Lake Tahoe, en Californie. Les essais en service devraient commencer au début de 1991.

SAAB Scania

De 1985 à 1988, Scania a utilisé quatre autobus alimentés par un carburant contenant de l'éthanol, dans le cadre du projet E95 relevant conjointement de l'industrie et du gouvernement suédois (24). Ces autobus ont été exploités à des fins de transport en commun de façon régulière à Gothenburg et à Ornskoldsvik. Ils avaient parcouru une distance combinée de plus de 350 000 km avant la fin des essais. Pendant les trois ans que durèrent ces essais, les niveaux de fiabilité et de disponibilité des moteurs demeurèrent très satisfaisants. Le carburant utilisé contenait 8 % de nitrate d'éthyle hexylique pour faciliter l'allumage. Les moteurs constituaient une version du moteur diesel Scania DS11 de 11 litres à 6 cylindres, à taux de compression de 18/1 et développant une puissance de 184 kW à 2 200 tr/min.

Par la suite, Scania a mis au point une nouvelle génération de moteurs alimentés à l'éthanol en se fondant sur l'expérience acquise lors du programme E95. Les nouveaux moteurs dérivaient encore du modèle DS11 qui avait amplement fait ses preuves, mais étaient alimentés par un mélange comprenant de l'éthanol et entre 1 et 2 % de l'accélérateur d'allumage Avocet produit par ICI. Le taux de

compression fut porté à 24/1, ce qui conféra au moteur une excellente stabilité d'allumage et un excellent rendement sur toute la gamme des vitesses malgré les très faibles concentrations d'additif. Les niveaux des émanations des gaz d'échappement furent jugés conformes aux normes de l'EPA qui entreront en vigueur en 1994.

En 1989 et 1990, la ville de Stockholm a mis en service 30 autobus équipés de ce nouveau type de moteur. Scania observe attentivement ses performances et continue à le perfectionner.

L'éthanol utilisé dans les projets suédois est produit à partir de biomasse forestière. Les utilisateurs préfèrent l'éthanol au méthanol parce que l'éthanol n'est pas toxique et qu'il peut être utilisé en milieu de travail sans qu'il soit nécessaire d'amender les règlements existants sur la santé et la sécurité.

Mitsubishi Motors Corporation

La société Mitsubishi a effectué des travaux très poussés de recherche et de développement sur un moteur d'essai à cylindre unique avant de produire une version au méthanol de son moteur d'autobus à grand rendement de 11,15 litres à 6 cylindres (26). Cette société a également effectué des essais sur des systèmes d'allumage par étincelle et par bougie de préchauffage. Les résultats des analyses des gaz d'échappement du moteur à 6 cylindres démontrèrent que les taux de HC et de CO étaient élevés dans le cycle japonais à 5 modes, surtout lorsque les moteurs fonctionnaient à faible charge. Toutefois, l'installation d'un convertisseur à oxydation permit de réduire considérablement les taux de ces deux polluants . On n'a pas encore utilisé ce moteur dans un véhicule en service.

Nissan Diesel Motor Company

Les travaux de développement du moteur au méthanol de véhicules lourds de la société Nissan ont été axés sur la production d'une version de son moteur de 11,67 litres à 6 cylindres alimenté à 100 % au méthanol et à allumage par bougies jumelées. Ce moteur a subi des essais de durabilité pendant 500 heures et Nissan en a publié les résultats. Nissan a signalé que la forte usure des soupapes et des sièges de soupapes ainsi que la durabilité des bougies posaient d'important problèmes. Ce moteur n'a pas encore été configuré pour installation sur un véhicule (27).

Komatsu Ltd.

La société Komatsu a accumulé une expérience considérable lors du développement d'une version au méthanol de son moteur diesel pour poids moyen qui a subi ses premiers essais sur un autobus il y a plus de cinq ans. Komatsu a ensuite entrepris de développer un plus petit moteur, d'une cylindrée de 3,26 litres, qui équipe des camionnettes et certains types de machines de construction (28). Ce moteur fait l'objet d'essais à grande échelle en parc de véhicules sous la direction du ministère japonais des transports. D'importants centres de recherche, les associations de camionnage et les gouvernements locaux coopèrent à ces essais qui portent sur un parc de 60 véhicules alimentés au méthanol dont 23 sont équipés de moteurs Otto à allumage par étincelle et 37 de moteurs diesel Komatsu (29).

Le moteur Komatsu est doté de bougies pour faciliter l'allumage du carburant. Bien que la société Komatsu connaisse les avantages offerts par les autres modes d'allumage en termes d'efficacité et de durabilité, elle a cependant opté à l'heure actuelle pour l'allumage par bougies en raison de leur relative simplicité d'installation et de la stabilité de leurs caractéristiques d'allumage. La première des camionnettes du parc est entrée en service en décembre 1986. Par la suite, les véhicules d'essai ont parcouru les villes de Tokyo, d'Osaka, de Kanagawa et d'Aichi. Ils ont été utilisés aux fins de livraison par des entreprises locales de camionnage, dans le cadre d'accords spéciaux de crédit-bail. L'objet des essais était de démontrer qu'il existe un moyen de réduire la dépendance totale du Japon vis-à-vis des importations de pétrole et, en même temps, de s'attaquer à son problème de pollution de l'air. Les émanations provenant des gaz d'échappement des véhicules alimentés au méthanol se sont révélées bien moindres que celles des parcs similaires de véhicules à moteurs diesel.

Valmet

Le Centre de recherche technique de Finlande et l'Université technique d'Helsinki ont entrepris en commun un projet visant à convertir au méthanol un moteur diesel turbocompressé Valmet 611. Essentiellement, le moteur a été modifié pour en faire un moteur à caburateur et allumage par bougies. Les autres modifications ont porté notamment sur la réduction du rapport de compression, l'installation de carburateurs jumelés à tirage descendant, de pompes d'alimentation électriques et d'un système d'allumage à haute

impulsion. On procéda également à l'installation d'un système auxiliaire de démarrage à froid par injection d'essence dans la tubulure d'admission. À l'origine le diesel turbocompressé 611 à cylindrée de 6,6 litres développait une puissance nominale de 120 kW à 2 400 tr/min. Le moteur converti au méthanol développe 85 % de la puissance maximale et 90 % du couple du moteur diesel.

Le moteur converti a été installé sur un camion Karhu-Sisu à poids brut nominal de 16 000 kg. On procéda à des essais dynamométriques contrôlés sur route et sur châssis et l'on compara les résultats à des essais similaires effectués avant que le moteur n'ait été converti en 1986-1987. On observa que le rendement du camion était généralement très acceptable et l'on jugea que l'on pouvait corriger la plupart des déficiences par rapport au diesel en entreprenant un programme de perfectionnement du moteur. Ce projet était particulièrement destiné à démontrer que l'on pouvait convertir un moteur du diesel au méthanol avec des fonds et des ressources limités et que l'on pouvait entretenir et exploiter le véhicule qui en résultait à l'aide des techniques existantes bien connues (30).

Detroit Diesel Corporation

La société DDC demeure à l'avant-garde du développement des moteurs au méthanol de véhicules lourds aux États-Unis et s'apprête à mettre en marché, en 1991, son moteur d'autobus de la série 92 à deux temps alimenté au méthanol (31).

Les moteurs au méthanol de Detroit Diesel ont été utilisés pour des essais en parcs de véhicules pendant plusieurs années depuis l'inauguration en Californie, en 1984, du véhicule original "Méthanol 1" qui fut le premier autobus de transport alimenté au méthanol à être utilisé aux États-Unis (15, 16).

Les premiers travaux exploratoires relatifs au méthanol furent entrepris sur un moteur de la série 71 (à cylindrée de 71 po^3 par cylindre), mais l'on sélectionna la série 92 à plus grande cylindrée pour le développement intensif du moteur d'autobus moderne de base de DDC. Récemment, l'intérêt accru qui s'est manifesté aux États-Unis pour l'alimentation au méthanol, particulièrement dans les États de New York et de Californie, a incité DDC à reprendre ses travaux sur le moteur à six cylindres en ligne de la série 71 et à étendre le programme à un prototype de moteur de la série 149. Les gros moteurs de la série 149 doivent être intégrés à des groupes électrogènes et développer environ 100 hp au frein par cylindre.

Le moteur Detroit Diesel est un moteur à deux temps à balayage équicourant et induction d'air par soufflante. L'allumage des moteurs au méthanol dépend d'un dispositif de commande de l'air de balayage, qui retient une partie des gaz d'échappement brûlés dans le cylindre de façon à y maintenir la température à un niveau assez élevé pour favoriser l'auto-allumage. Il a été nécessaire de munir le moteur de bougies de préchauffage pour rendre l'allumage fiable au démarrage et à faible charge. Néanmoins, les moteurs au méthanol à haute compression (23/1) les plus récents n'ont besoin des bougies de préchauffage que pour le démarrage à froid et le réchauffage initial. Jusqu'à récemment, on utilisait du méthanol pur à 100 %, mais DDC vient de commencer à utiliser un additif mis au point par la société Lubrizol de manière à résoudre les problèmes persistants relatifs au colmatage de la buse d'injection. La teneur en additif est nettement inférieure à 1 %.

La plupart des essais en pratique touchant les moteurs DDC ont été effectués sur des autobus. Le nombre de ces autobus a augmenté régulièrement jusqu'à ce que l'on compte 50 autobus équipés de moteurs au méthanol de la série 6V-92TA en service au Canada et aux États-Unis. Au cours des années 1988, 1989 et 1990, le programme de pré-production des moteurs au méthanol de DDC, en expansion rapide, a permis de mettre des autobus en service à Phoenix, Denver, New York et Los Angeles. Le groupe le plus important d'autobus au méthanol (30 véhicules) est exploité à Los Angeles par les services de transport en commun du Southern California Rapid Transit District. Ce parc d'autobus dispose également de 12 moteurs DDC supplémentaires qui utilisent dans leur carburant un accélérateur d'allumage et qui font l'objet d'un programme d'évaluation parallèle. Des moteurs au méthanol de DDC ont égalemnt été installés sur des camions en 1990. Cinq camions équipés de moteurs au méthanol des séries 71 et 92 ont été mis en service en Californie à la fin de 1989 et dans la première moitié de 1990. Ces véhicules servent à divers travaux urbains et municipaux. Detroit Diesel a aussi livré deux moteurs au méthanol horizontaux de la série 71 à l'Italie pendant l'été 1990, pour utilisation dans le cadre des essais dirigés par Ecofuel touchant le parc d'autobus de la ville de Milan.

Detroit Diesel a signé un contrat de fourniture de moteurs de la série 92 dans le cadre du "Programme de démonstration de l'efficacité des carburants propres dans des autobus scolaires sécuritaires" qui vient d'être lancé en Californie. Cinquante autobus entreront en service en 1990-1991. Certains d'entre eux ont

déjà été livrés aux commissions scolaires participantes. On s'attend à ce qu'un plus grand nombre d'autobus au méthanol participent au programme après 1991.

Des autobus propulsés au méthanol ont été mis en service dans le cadre du projet canadien MPMP depuis la fin de 1986. Deux de ces véhicules sont utilisés à Winnipeg, au Manitoba, et deux autres à Medicine Hat, en Alberta. La ville de Medicine Hat a ajouté trois nouveaux autobus au méthanol à son parc en janvier 1990, puis trois autres en septembre 1990 dans le cadre de son plan de conversion de tous ses autobus au méthanol. À l'heure actuelle, la ville dispose de huit autobus propulsés par des moteurs DDC au méthanol, ce qui représente 50 % de son parc, et se sert de ces autobus pour la majeure partie de ses services réguliers.

La société DDC diffuse régulièrement un bulletin mensuel concernant ses essais relatifs à l'alimentation au méthanol auprès d'un vaste public composé d'organismes gouvernementaux, de groupes de recherche et de milieux industriels. Elle a fourni également des moteurs alimentés à l'éthanol identiques du point de vue conception aux moteurs au méthanol à des fins d'essai en parcs d'autobus aux villes de Peoria, en Illinois, et de Regina, en Saskatchewan. Au début de 1991, treize de ces autobus devraient entrer en service à Peoria et deux à Regina.

Isuzu Motors Ltd.

En collaboration avec l'Institut de technologie de Kitami, la société Isuzu a examiné les effets exercés par la forme du jet d'injection, le réglage de l'allumage et le mode d'induction de l'air sur le démarrage et le réchauffage d'un moteur au méthanol à allumage par bougies. Le moteur utilisé était doté d'un dispositif de recyclage des gaz d'échappement pour faire varier la teneur en oxygène de l'air d'admission. L'objectif visé était d'obtenir un démarrage fiable en présence d'une vaste plage de températures ambiantes et de réduire les émanations des gaz d'échappement pendant la phase de réchauffage.

Le moteur était une version modifiée d'un moteur de camion de 11 litres à bougies d'allumage, alimenté au méthanol à 100 %. On utilisa trois types élémentaires de buses d'injection comportant 5, 6 et 8 trous. La buse à 8 trous vaporisait le carburant de façon uniforme dans l'ensemble de la chambre de

combustion, tandis que les buses à 5 et 6 trous concentraient les vapeurs dans un arc de 150 à 180 °. Les buses étaient disposées de différentes façons par rapport à la bougie d'allumage, mais l'un des jets était toujours dirigé directement vers elle. On put optimiser l'avance à l'allumage à 15° APMH. Les buses d'injection par concentration des jets assurèrent un temps de démarrage bien meilleur que celui offert par la buse à 8 jets à espacement uniforme, c'est-à-dire un démarrage dans les 10 secondes suivant le lancement à -15 °C. On put également réduire d'environ 30 % les émanations de CO lors du démarrage par rapport aux émanations produites dans le cas de la configuration à 8 jets. Le dispositif RGE n'a pas constitué une aide sûre au démarrage et le rendit même impossible lorsque la teneur de l'air d'admission dépassait 45 %. Toutefois, en accélération, le dispositif RGE permit de réduire la consommation de carburant pendant le réchauffage de l'ordre de 30 % en raison du recyclage des gaz d'échappement du méthanol non brûlé. Aucun des travaux entrepris ne permit de réduire l'odeur des gaz d'échappement dégagés pendant le réchauffage à un niveau jugé acceptable par les chercheurs.

Toyota Motor Corporation

Chez Toyota, les travaux relatifs au moteur au méthanol se sont concentrés sur une version de son moteur diesel de 2,2 litres à 4 cylindres. Ce moteur est doté d'un nouveau genre de système d'alimentation, la "double alimentation par injecteur unique" (51). Ce système permet d'introduire à la fois le méthanol et le carburant diesel dans une seule buse d'injection par cylindre et de mélanger, d'injecter et d'allumer le carburant en une seule opération continue. Les proportions respectives des carburants peuvent varier en fonction de la charge au moteur, la teneur en méthanol allant de 30 % au ralenti à 60 % en faible charge et pouvant grimper à 94 % en charge maximale. Ce principe combine le concept de double alimentation à deux injecteurs utilisé par Volvo et les expériences d'émulsionnement en ligne du carburant menées il y a quelques années par la Ontario Research Foundation (devenue ORTECH International). Dans le cadre de ses recherches, Toyota a exploré les caractéristiques de la forme d'un double jet de carburant soigneusement réglé de sorte que le carburant diesel forme un "filet" qui entoure le jet principal de méthanol émergeant de chaque orifice, et qui est alors entièrement exposé à la chaleur de la compression et à l'oxygène disponible de manière à générer la combustion. Le moteur d'essai a présenté une CCPF égale à celle du moteur diesel de base, des émanations similaires de CO et de HC et des concentrations d'oxydes

d'azote environ la moitié moindres que celles provenant du moteur diesel. Il n'a pas été nécessaire de doter le moteur d'un catalyseur des gaz d'échappement pour obtenir ces résultats. Parmi les autres avantages observés, notons l'absence prévue de fumée et de suie d'échappement et le faible bruit engendré par la combustion en raison de la régulation du taux de combustion. La variation de la proportion de méthanol en fonction de la charge assure un fonctionnement régulier quelle que soit la vitesse choisie, surtout au ralenti. Les étapes subséquentes de la recherche porteront sur l'évaluation de la facilité de démarrage du moteur, sur sa fiabilité à long terme et sur la durabilité du système d'alimentation à injecteur unique.

Japan Automobile Research Institute (JARI)

Le Japan Automobile Research Institute a effectué des travaux de recherche et de développement approfondis sur des moteurs au méthanol du type diesel (58). Il a utilisé deux types de moteurs, un moteur à double carburant de 3,5 litres et un moteur de 5,8 litres à allumage assisté par étincelle. Le premier moteur a été installé sur un petit autobus et le second, qui développait 136 hp au frein à 3 200 tr/min, sur un autobus de taille moyenne (32 passagers). Ce dernier autobus fait actuellement l'objet d'un programme d'essai et de développement à long terme au centre de recherche et sur les terrains d'essai automobile de l'Institut, à Tsukuba. Les travaux se déroulent depuis plus de cinq ans et comprennent l'étude des divers aspects de la conception, de la construction, du fonctionnement et de la fiabilité des véhicules alimentés au méthanol.

C. UTILISATION DES CONVERTISSEURS CATALYTIQUES

La plupart des constructeurs japonais semblent avoir jugé souhaitable le recours à la réduction catalytique des émanations de gaz d'échappement dès les premières étapes des programmes de développement des moteurs de leurs véhicules lourds alimentés au méthanol. Les autres entreprises qui ont effectué des recherches à ce sujet comprennent MAN, Detroit Diesel Corporation et Cummins Engine Company. L'important parc japonais de camionettes au méthanol équipées de moteurs Komatsu et de convertisseurs montés sur châssis fournies par Toyota et Nissan représente l'une des plus importantes concentrations de véhicules au méthanol équipés de catalyseurs. Les sociétés Deutz et Daimler-Benz ont effectué dans le passé quelques travaux sur la propulsion au méthanol avec catalyseur, mais ont plus tard décidé de consacrer leurs efforts de recherche au raffinement de la conception fondamentale des moteurs.

Les principaux fabricants de catalyseurs ont tous, eux aussi, effectué certaines recherches sur les moteurs à alcool, généralement en collaboration avec un ou plusieurs fabricants de véhicules. Par exemple, Engelhard, Degussa et Engine Control Systems ont tous fourni des matrices catalytiques à MAN, tandis que Corning et Johnson-Matthey fournissaient des composants pour la mise au point des appareils développés par Detroit Diesel et que Nelson Muffler entreprenait l'étude de l'enveloppe des catalyseurs. Presque toutes ces entreprises se sont également livrées à des recherches internes, mais ne sont pas prêtes à en révéler les détails pour des raisons touchant les droits de propriété. La société Engelhard du Japon a fourni la matrice pour les essais d'activité catalytique effectués par Fujita, Ito et autres à l'Université de Hokkaido.

Nous présentons dans cette section de brèves mises à jour des positions des principaux fabricants de moteurs diesel concernant l'emploi des convertisseurs catalytiques sur leurs moteurs au méthanol.

Cummins Engine Company

La société Cummins continue à étudier la méthode d'enrichissement du méthanol à l'aide d'un additif destiné à accélérer l'allumage. Elle a confié la majeure partie de son programme d'essais à ORTECH International qui a étudié le rendement, l'endurance et les émanations des moteurs au méthanol. ORTECH a également étudié les effets des variations de concentration de l'accélérateur d'allumage (il s'agissait en ce cas de l'additif Avocet produit par ICI).

Le fait de réduire le pourcentage d'additif, qui coûte relativement cher, représente des économies évidentes, mais les essais ont prouvé que certaines des émanations, en particulier celles des hydrocarbures (y compris le méthanol non brûlé), pouvaient augmenter à mesure que l'on diminait le pourcentage d'additif. Cummins a commencé à étudier la réduction catalytique des gaz d'échappement dans le cadre de son programme visant à atteindre les taux d'émanations permis par les normes de 1991 et de 1994 à l'aide de concentrations d'additif de l'ordre de 1 à 2 %. À ce jour, tous les travaux ont été effectués par les services internes avec la coopération d'au moins un des principaux fabricants de catalyseurs. Les travaux actuels ont un caractère privé et ne peuvent donc faire l'objet d'une divulgation à l'extérieur.

MAN

Depuis 1984, les autobus MAN sont normalement équipés de convertisseurs catalytiques. D'après les premiers rapports, ces appareils s'étaient révélés "très efficaces pour réduire les émanations d'hydrocarbures et surtout d'aldéhydes". MAN fait état d'un rapport très élevé entre les teneurs en hydrocarbures avant et après leur passage dans le catalyseur. Ce rapport peut atteindre 27 à 1 (15). MAN a également utilisé des catalyseurs à oxydation pour réduire les émanations de CO, ce qui a permis aux autobus de se conformer sans difficulté aux normes de 1991 de l'EPA relatives aux émanations (12). Cette société a aussi indiqué que les catalyseurs permettaient de réduire quelque peu les dégagements de particules.

Les premiers autobus MAN au méthanol, qui étaient dotés de moteurs à aspiration naturelle, étaient équipés de doubles convertisseurs desservant chacun trois cylindres. Les convertisseurs étaient montés très près du moteur pour assurer le chauffage adéquat du substrat. Cette disposition s'avéra satisfaisante sur le plan des émanations, mais très vulnérable au brûlage destructif lorsque le moteur évacuait du carburant non brûlé suite à des défauts d'allumage. La défaillance des bougies d'allumage et l'insuffisance en carburant représentent deux des causes habituelles de défauts d'allumage. MAN a pu résoudre en grande partie ces problèmes grâce au développement continu du moteur. Des essais parallèles sur les convertisseurs démontrèrent qu'il n'était pas nécessaire de les monter si près du moteur pour obtenir un chauffage adéquat du substrat.

En conséquence, MAN redessina l'ensemble de façon à placer un seul convertisseur de plus grande taille entre 0,5 et 1 m du moteur et à y faire passer la totalité des gaz d'échappement provenant des six cylindres. Cet éloignement du convertisseur provoqua une baisse de température ne dépassant pas 15 °C et une réduction de l'effet des défauts d'allumage dans n'importe quel cylindre étant donné que chacun ne contenait plus qu'un sixième du volume total des gaz non brûlés au lieu d'un tiers. Cette configuration est devenue la norme pour les moteurs à aspiration naturelle. En ce qui concerne les autobus à turbocompresseurs utilisés par les services de transport en commun de Seattle, MAN est revenue à une configuration à doubles convertisseurs étant donné que, dans les moteurs turbocompressés, le débit de gaz est plus élevé. MAN a cependant retenu les avantages du convertisseur unique dans la mesure où les

gaz d'échappement provenant de tous les cylindres passent par un seul turbocompresseur et se divisent ensuite en deux courants parallèles. Cela présentait une déviation par rapport à la version originale où chaque groupe de trois cylindres alimentait directement son propre convertisseur. Bien que l'on ait beaucoup réduit la vulnérabilité du convertisseur au brûlage, on n'en a pas complètement éliminé la possibilité et c'est pourquoi l'ensemble est pourvu d'une dérivation d'urgence. On estime que les températures de brûlage peuvent atteindre 1 200 °C, ce qui suffit à causer la destruction rapide du convertisseur.

Engine Control Systems Ltd., d'Aurora, en Ontario, a mis au point un système qui peut détecter les conditions créant un potentiel de destruction. Le système est capable, dans un intervalle de huit secondes, de détourner les gaz d'échappement du convertisseur catalytique qui est très sensible. Les convertisseurs catalytiques mis au point par MAN sont préfabriqués par la Zuena-Staerker Company de Augsbourg et les matrices sont fournies par certains manufacturiers éminents.

Pendant un certain temps, on a pu se procurer chez MAN, sur une base commerciale, des autobus propulsés au méthanol et munis de convertisseurs catalytiques. Les services de transport en commun de la ville de Seattle ont reçu dix autobus de ce genre au début de 1987 et les ont mis en service régulier. Depuis cette date, MAN a choisi de ne pas poursuivre son programme de construction d'autobus au méthanol.

Detroit Diesel Corporation

Les moteurs DDC sont très utilisés dans les autobus de transport en commun des villes d'Amérique du Nord. C'est pourquoi le fabricant de ces moteurs s'est toujours beaucoup soucié des normes de l'EPA relatives aux émanations des autobus qui doivent entrer en vigueur dès 1991. La société DDC a entrepris le programme le plus complet de développement et d'essai mené à ce jour sur les moteurs au méthanol de véhicules lourds. Elle dispose maintenant d'une version au méthanol de son moteur à deux temps bien connu de la série 92 qu'elle s'apprête à mettre en marché en 1991 (31). Le programme comprend des travaux sur le convertisseur catalytique, en coopération avec plusieurs fabricants bien connus de silencieux et de substrats catalytiques. L'objectif de ce programme est de mettre au point un ensemble combinant les caractéristiques nécessaires de débit, de durabilité et de compacité lui permettant d'être logé

dans l'espace restreint alloué au système d'échappement d'un autobus de transport en commun.

Au début de ses travaux de laboratoire, DDC s'est servie de doubles convertisseurs du genre "lit de perles" d'un volume de 4,3 litres qu'elle a monté à la verticale au-dessus du moteur d'essai 6V-92TA (à turbocompresseur et refroidisseur secondaire). Deux catalyseurs furent évalués : un appareil de série du type à oxydation au platine-palladium fourni par la division AC de General Motors, et un appareil au palladium-argent mis au point par GM Research Laboratories. Ce dernier appareil s'avéra particulièrement efficace pour l'oxydation du méthanol. On soumit les moteurs aux essais américains des types à 13 modes et à phases transitoires avec et sans les convertisseurs catalytiques. On préleva des gaz d'échappement à l'entrée et à la sortie des convertisseurs afin d'évaluer les taux de conversion. Les essais sans convertisseurs furent effectués avec le moteur développant une puissance nominale de 200 kW à 2 100 tr/min, tandis que les essais avec convertisseurs furent effectuées à l'aide d'un moteur moins puissant de 154 kW à 2 100 tr/min pour tenir compte de la contre-pression additionnelle des gaz d'échappement.

On remarqua que le catalyseur au platine-palladium offrait de bons taux de conversion du méthanol imbrûlé et du CO, mais qu'il favorisait le débit de formaldéhyde. Le catalyseur au palladium-argent était moins efficace pour la conversion du méthanol imbrûlé et du CO, mais assurait un haut niveau de conversion du formaldéhyde. Aucun des deux catalyseurs n'eut d'effet notoire sur les émanations d'oxydes d'azote. Ces tendances se révélèrent uniformes aussi bien dans les essais à 13 modes que dans les essais à phases transitoires, bien qu'on ait noté des variations de l'efficacité réelle. Le mémoire soumis par McCabe, Mitchell et autres (32) donne une description détaillée des résultats et des commentaires sur les causes de ces tendances.

La société DDC a alors entrepris des essais en parc de véhicules en se servant d'un convertisseur du type "lit de perles" combiné à un silencieux, le tout ayant les mêmes dimensions qu'un silencieux normal d'autobus de la série RTS. En mars/avril 1988, six autobus propulsés au méthanol furent mis en exploitation pour le compte des services de transport en commun de Triboro, dans la ville de New York. Quatre de ces autobus étaient équipés de convertisseurs catalytiques, un au platine, un autre à l'argent et les deux derniers au platine-argent. Les deux autres autobus ne reçurent pas de convertisseurs et servirent de véhicules

"témoins" de façon à servir de comparaison lors de la mesure des réductions des émanations produites par les moteurs munis de convertisseurs.

Les essais comparatifs sur châssis portant sur les émanations sont effectués par les laboratoires d'essai du service de la protection de l'environnement de la ville de New York. Les cycles d'essai sont propres à New York. Ils ont été élaborés de façon à tenir compte des conditions de circulation qui affectent l'exploitation des autobus dans cette ville. Les résultats ne correspondent pas directement à ceux des essais fédéraux à 13 modes ou à phases transitoires. Le service de protection de l'environnement de la ville de New York a publié des rapports sur deux séries d'essais (33) et présenté des comparaisons entre les autobus à moteur diesel et les autobus à moteur au méthanol sans catalyseurs ou avec catalyseurs. Parmi les tendances générales qui en ressortent, on note de très faibles émanations de particules provenant des autobus à catalyseurs, de hauts niveaux de formaldéhyde provenant des autobus au méthanol, de fortes concentrations d'hydrocarbures provenant de tous les autobus au méthanol (il s'agit du méthanol non brulé), mais des niveaux beaucoup plus faibles d'oxydes d'azote en provenance des autobus au méthanol. Toutes les comparaisons précédentes ont été établies par rapport aux autobus à moteur diesel courant. Les véhicules au méthanol dégagent généralement beaucoup plus de CO. On a noté de très grandes différences dans les taux d'émanations selon le type de catalyseur utilisé. Les catalyseurs au platine réduisent plus efficacement le CO et les HC, tandis que l'argent est plus efficace pour les aldéhydes. Par contre, les effets sur les oxydes d'azote sont peu évidents.

Les comparaisons entre la première série d'essais effectués en mai 1988 et la seconde série, c'est-à-dire en moyenne sept mois et 20 000 milles plus tard, font ressortir une hausse sensible des émanations de CO et de HC en provenance des autobus au méthanol. On a jugé que cela pouvait être dû à la diminution de l'efficacité de la combustion et des catalyseurs. On a d'ailleurs noté une augmentation parallèle des taux de consommation de carburant des véhicules. La société Detroit Diesel a récemment diffusé une documentation sur sa gamme de moteurs d'autobus qui seront offerts en 1991. Cette gamme comporte des moteurs alimentés au méthanol et à l'éthanol qui respecteront les normes de l'EPA de 1991 sur les émanations des autobus. Les clients désireux d'obtenir des taux d'émanations encore plus faibles pourront équiper ces moteurs de convertisseurs catalytiques.

Hino Motors Limited

La société Hino a mis au point une version au méthanol à allumage assisté par étincelle de son moteur diesel à injection directe de 9,88 litres à 6 cylindres (21). Ce moteur était équipé à la fois d'un convertisseur catalytique à oxydation et d'un dispositif de recyclage des gaz d'échappement (RGE). Le dispositif RGE avait pour but de faciliter l'auto-allumage du carburant en augmentant la température à l'intérieur des cylindres en présence de conditions convenables de charge et de vitesse. Le recours au dispositif RGE a permis de faire fonctionner le moteur par allumage par étincelles ou par auto-allumage. Comme chacun des modes exerçait des effets distincts sur les caractéristiques des émanations, les recherches visèrent à explorer leurs mérites relatifs.

Hino a utilisé un convertisseur au platine-palladiaum à matrice monolithique fourni par Tokyo Roki Limited. Parmi les problèmes de développement observés, Hino a observé des cas de brûlage, de fissuration et, en général, une courte durée de vie utile. Hino pense que les futurs moteurs au méthanol auront probablement besoin de convertisseurs pour limiter les émanations. Hino n'a pas encore installé d'ensembles moteur-convertisseur sur des véhicules en service.

Komatsu

Komatsu a fourni un certain nombre de moteurs au méthanol à allumage par compression à des fins d'essai dans le cadre d'un programme supervisé par le ministère des transports du Japon. L'essai portait sur 30 petits camions loués à bail à des entreprises de transport local de Tokyo, Osaka et Kanagawa. Tous les camions furent munis de convertisseurs catalytiques et soumis à des essais de durabilité à long terme qui se poursuivaient encore au moment de la rédaction de la présente étude. On signale que les catalyseurs parviennent efficacement à réduire les taux d'hydrocarbures et d'oxyde de carbone, de même qu'à limiter les niveaux d'aldéhyde en présence d'une charge partielle lorsque la combustion dans les cylindres est incomplète (28).

Le catalyseur utilisé est le palladium disposé en nid d'abeille. Komatsu a signalé que l'on ne pouvait prédire la durée de vie utile du catalyseur; elle est souvent inférieure à 20 000 km. Les taux d'émanations sont conformes au règlement japonais (essai à 6 modes), même si le catalyseur subit les effets du

vieillissement. Komatsu s'attend à améliorer encore la réduction des niveaux d'aldéhyde en présence d'une charge partielle grâce à la poursuite de ses études conceptuelles.

Mitsubishi Motors Corporation

La société Mitsubishi a effectué des travaux approfondis de recherche et de développement sur un moteur d'essai à cylindre unique avant de produire une version au méthanol de son moteur d'autobus lourd de 11,15 litres à 6 cylindres (26). Elle a essayé les systèmes d'allumage à bougie ordinaire et bougie de préchauffage. Les essais portant sur les émanations du moteur à 6 cylindres ont fait ressortir que dans le cycle d'essai japonais à 6 modes les niveaux de HC et de CO étaient élevés, surtout en fonctionnement à faible charge. Néammoins, l'installation d'un convertisseur à oxydation permit d'obtenir des réductions considérables des niveaux de ces deux polluants. Il est probable que la société Mitsubishi utilisera des convertisseurs sur les véhicules munis de ce type de moteur qu'elle produira.

Nissan Diesel Motor Company

Les travaux de développement d'un moteur au méthanol pour poids lourd entrepris par la société Nissan portent sur une version de son moteur de 11,67 litres à 6 cylindres alimenté à 100 % au méthanol et doté d'un système d'allumage par bougies jumelées. Comme la plupart des autres fabricants japonais qui se sont livrés à des expériences sur des moteurs au méthanol à allumage combiné, par étincelle et compression, Nissan a opté pour l'installation sur le moteur d'un convertisseur catalytique à oxydation dès le début de son programme de développement. Au bout de 500 heures d'essais d'endurance, le catalyseur au platine à nid d'abeille fut l'un des composants que l'on examina pour en évaluer la détérioration. Les caractéristiques primaires que l'on étudia furent son aptitude à oxyder le CO et le méthanol non brûlé. Le rapport de Nissan sur son programme de développement (27) fait état d'une hausse de 60 °C de la température de réaction du convertisseur après un essai d'endurance de 500 heures.

Plusieurs gouvernements et organisations indépendantes ont effectué des recherches sur les convertisseurs catalytiques associés à des moteurs à alcool. La plupart de ces travaux ont été entrepris avec la collaboration de fabricants de

moteurs ou de véhicules, ou des deux, et ont parfois débouché sur des essais en parcs de véhicules en exploitation réelle. Beaucoup de ces programmes ont donc été mentionnés dans d'autres sections du présent document. Citons, par exemple, la participation du ministère des Transports du Japon aux essais approfondis de camionnettes à moteurs Komatsu, et le parrainage partiel du programme d'essai des autobus au méthanol des services de transport en commun de Triboro, à New York, par l'EPA et par les services de recherche et de développement en énergie de l'État de New York. Deux autres programmes apportent leur contribution à la somme totale des recherches par le biais de travaux réalisés surtout en laboratoire. Il s'agit des travaux en cours à l'Université d'Hokkaido et d'un nouveau projet qui est sur le point de démarrer à l'Institut de recherche du Sud-Ouest, au Texas. Ce dernier projet est parrainé par la Commission des ressources atmosphériques de Californie.

Université d'Hokkaidō

Fujita, Ito et Sakamoto ont publié d'autres rapports sur leurs études en cours concernant la performance des convertisseurs catalytiques. En créant un courant de gaz d'échappement artificiels composés de produits de combustion courants, ils ont pu démontrer l'activité catalytique en présence d'une large variété de conditions simulées de fonctionnement des moteurs. Les résultats obtenus sont applicables aux moteurs à allumage par étincelles comme aux moteurs à allumage par compression (34,35).

Le catalyseur d'essai du type à lit de perles utilisé, qui a été fabriqué par la société Engelhard du Japon contenait en poids 0,5 % de platine sur oxyde d'aluminium. En présence d'oxygène et d'azote, seul le méthanol non brûlé s'oxyde facilement dans les limites d'une large plage de température. L'introduction de composants courants de gaz d'échappement, en particulier d'oxyde d'azote, réduit l'aptitude du catalyseur à oxyder complètement le méthanol non brûlé et provoque une concentration de formaldéhyde. On observa que les taux et rapports réels d'oxydation du méthanol et de génération de formaldéhyde dépendaient du taux de changement de la concentration d'oxyde d'azote et des changements de température du catalyseur. Selon les auteurs, on peut favoriser l'uniformité du rendement du catalyseur en service en utilisant des dispositifs de préchauffage pour le démarrage à froid et des moyens d'empêcher les fluctuations de température pendant le fonctionnement à chaud. Si l'on veut que le catalyseur d'un véhicule soit utile, ce catalyseur doit être capable d'assurer une oxydation adéquate en présence d'oxyde d'azote.

California Air Resources Board
(Commission des ressources atmosphériques de Californie)

La California Air Resources Board encourage la recherche relative aux convertisseurs catalytiques destinés aux véhicules propulsés au méthanol. À l'heure actuelle, elle s'intéresse particulièrement aux automobiles et parraine un programme entrepris par le Southwest Research Institute (SWRI), de San Antonio. Tous les grands fabricants de catalyseurs des États-Unis, notamment Allied Signal, Engelhard et Johnson Matthey, ont été invités à proposer des recommandations et à soumettre des échantillons de matrices de catalyseurs pour essai. Les matrices d'essai sont livrées en dimensions externes standardisées de façon à être interchangeables à l'intérieur des enveloppes fabriquées par l'Institut.

Dans le cadre de ce programme, on utilise quatre configurations moteur-véhicule : une Camry, de Toyota, propulsée au carburant M85, des véhicules à carburant flexible fournis par Ford et Chevrolet, et une automobile propulsée au carburant M100. Il est probable que ce dernier véhicule devra être fabriqué spécialement puisqu'aucun fabricant des États-Unis ne construit actuellement de véhicules propulsés au M100.

Le programme d'échantillonnage des émanations est axé sur la recherche des catalyseurs les plus efficaces. Une sélection progressive permettra de réduire à deux ou trois le nombre de configurations qui seront soumises à des essais intensifs. Éventuellement, la configuration jugée optimale fera l'objet d'un programme d'évaluation en pratique à long terme.

D. RÉSULTATS DES ESSAIS RELATIFS AUX ÉMANATIONS

Compte tenu des variations relativement importantes sur le plan global entre les diverses méthodes d'essai sur les émanations, les fabricants souhaitent que l'on normalise les règlements sur les émanations des gaz d'échappement. Voici quels pourraient être les avantages d'une telle normalisation :

- Pour le fabricant : réduction des coûts de développement, de production et des essais de conformité.

- Pour le consommateur : moindres coûts dérivant des économies réalisées par les fabricants.

- Dans l'ensemble : les avantages résultant de la réglementation des émanations dans certains pays ou régions ne pourront être annulés par les émanations non réglementées (ou sous-réglementées) des pays voisins.

La difficulté de parvenir à un consensus global découle de la non concordance des objectifs des gouvernements et des différences entre les cycles d'essai prescrits par les divers règlements.

Les cycles d'essai prescrits aux États-Unis, en Europe et au Japon ont d'abord été élaborés à des fins propres à ces divers pays. Bien que l'on observe dans certains pays, en particulier dans les pays développés, une tendance à l'utilisation des essais à phases transitoires du genre américain, la plupart des pays utilisent encore les essais à phases stables du genre européen. Cela tient au fait que les essais tels que ceux qui sont prescrits par la norme CEE49 (qui dérivent du cycle d'essai à 13 modes des États-Unis) ont été approuvés par les Nations Unies. En outre, le fait qu'il s'agisse d'un essai à phases stables, signifie que la mise au point de la cellule d'essai exige des immobilisations de capitaux beaucoup moindres. Quoi qu'il en soit, la raison d'être du recours à un cycle d'essai quelconque est que toute amélioration (réduction) des émanations enregistrée dans un cycle d'essai donné devrait être enregistrée de façon similaire lorsque le moteur subit des essais dans le cadre d'un autre cycle, compte tenu d'éventuelles différences de degrés.

Les chercheurs et les fabricants de moteurs souhaitent tous que l'on évalue le rendement des moteurs au méthanol du point de vue des émanations. Comme on le voit au tableau II-1, étant donné qu'il existe différents cycles d'essai, il est normal de chercher à prédire les résultats d'un cycle d'essai portant sur les émanations d'un moteur en se fondant sur les résultats obtenus lors d'un autre cycle.

Les fabricants de moteurs ont essayé d'établir une corrélation entre les émanations enregistrées lors d'un cycle d'essai à phases stables et celles que l'on obtiendrait en phases transitoires dans le cas de moteurs alimentés au carburant diesel. Il est plus facile de trouver des installations où l'on peut effectuer les essais à phases stables. Dans le cas des fabricants de moteurs qui ne sont pas établis aux États-Unis, il se peut que les installations locales ne disposent pas de l'équipement nécessaire à la réalisation du cycle d'essai à phases transitoires du type américain qui doit être subi s'ils désirent vendre

leurs moteurs au Canada ou aux États-Unis. L'emploi des données obtenues lors d'un essai à phases stables ou même de cartes descriptives complètes du moteur permet à un fabricant de prédire les performances futures de son moteur sur le plan des émanations. Généralement, lorsqu'un fabricant met un nouveau moteur en fabrication ou lors de la phase de développement du moteur, il procède à des essais portant sur divers composants du moteur en question. Il se livre ensuite à des essais à phases stables de façon à recueillir des données sur les caractéristiques de fonctionnement du moteur, y compris des données sur les émanations. La compréhension de la façon dont ces composants affectent les émanations d'oxyde d'azote, de HC, de CO et de particules peut aider le fabricant à optimiser la configuration du moteur. Bien que de telles données ne puissent être substituées aux essais réels à phases transitoires aux fins d'homologation du moteur au Canada ou aux États-Unis, cela permet au fabricant de recueillir des données préliminaires sur les émanations à bien moindre coût.

Les éléments constitutifs du moteur tels que le turbocompresseur, la forme du bossage de came, le refroidissement à air de la charge, les commandes électroniques d'injection, etc. exercent tous un effet sur la réaction du moteur. Cette réaction a tendance à être dynamique. Si, par exemple, le moteur est équipé d'un turbocompresseur, il s'établira probablement un état transitoire entre le fonctionnement de cet appareil et le fonctionnement du moteur lors du passage entre les différents points de fonctionnement du moteur. Cela est particulièrement apparent pendant les phases d'accélération du moteur diesel, au moment où l'entrée de carburant est limitée de manière à empêcher l'émission de fumée ou le noyage du moteur jusqu'à l'entrée en action du turbocompresseur. C'est pourquoi, un moteur auquel on fait subir un cycle d'essai à phases transistoires ne franchit pas réellement une série d'étapes à phases stables. Pour ces raisons, certains chercheurs pensent que c'est le cycle d'essai du type à phases transitoires qui prévaudra bientôt.

La compréhension du cycle d'essai auquel est soumis un moteur aide à prédire les types de concentrations d'émanations auxquels on devrait s'attendre lors d'un autre cycle d'essai. La charge moyenne appliquée à un moteur pendant un essai portant sur les émanations et la température de fonctionnement du moteur exercent un effet sur les émanations totales enregistrées pendant le cycle d'essai. Dans le cas de la charge au moteur, le cycle d'essai à phases transitoires sur moteur diesel de véhicule lourd pratiqué aux États-Unis impose une charge

moyenne pendant la durée du cycle d'environ 22 % par rapport à 33 % dans le cas de l'essai américain à 13 modes qui est maintenant désuet. De plus, la quantité d'émanations n'augmente ni ne diminue nécessairement dans la même proportion que la puissance développée par le moteur, ce qui affecte les débits d'émanations spécifiques (c'est-à-dire le poids des composants des émanations multiplié par la charge par unité de temps). Il a également été démontré que les émanations des gaz d'échappement ont un rapport avec la température de fonctionnement du moteur. Dans le cas du cycle d'essai à phases transitoires d'un moteur diesel de véhicule lourd, l'essai débute par un démarrage à froid (25 °C) du moteur, alors que dans l'essai à 13 modes (ou dans les essais à phases stables),l'essai ne commence que lorsque le moteur s'est complètement réchauffé et que sa température s'est stabilisée. Finalement, lors des essais à phases stables, bien que l'on enregistre les données relatives à chaque mode, on n'utilise généralement que les données de la dernière minute ou presque.

Dans le passé, les fabricants de moteurs et les autres organismes ont fait beaucoup de recherches pour analyser les tendances corrélatives entre un essai sur les émanations à phases stables et un essai à phases transitoires. La plupart de ces recherches étaient axées sur un moteur donné de façon à permettre à son fabricant de prédire dans quelle catégorie ranger son moteur en se fondant sur une extrapolation des résultats de l'essai à 13 modes à phases stables (36). D'autres recherches ont été effectuées de façon à établir une caractérisation générale des tendances relatives aux émanations lorsqu'on passe du cycle d'essai à phases stables au cycle à phases transitoires (37). Bien que les tendances ainsi développées concernent les moteurs diesel, une grande partie du raisonnement sur lequel elles sont fondées s'applique aussi aux moteurs au méthanol. À mesure que les moteurs diesel de véhicules lourds alimentés au méthanol occupent une place grandissante dans les essais pratiques, on développe une base de données sur les émanations qui permettra d'établir une corrélation plus précise entre les résultats des essais à phases stables et ceux des essais à phases transitoires.

Contrairement à leurs équivalents alimentés au carburant diesel, les moteurs diesel de véhicules lourds alimentés au méthanol sont dotés de divers modes d'allumage. Les moteurs Caterpillar 3406 DITA et DDC 6V92TA qui, tous deux, ont été utilisés dans le cadre du programme MPMP au Canada, sont munis de bougies de préchauffage pour faciliter l'allumage. De plus, comme le moteur DDC est un moteur à deux temps, il utilise un volume variable réglé

d'air de balayage des gaz d'échappement pour aider à stabiliser la température de l'air à l'admission. Parmi les autres techniques utilisées pour favoriser la combustion, citons notamment le recours aux additifs d'accélération de l'allumage (Cummins utilise un accélérateur au cétane pour son moteur L-10), à la préinjection (le TD-100-A de Volvo), à la fumigation (Daimler Benz) et à l'allumage par étincelle (MAN). Toutes les techniques susmentionnées exercent un effet sur les émanations et l'on doit en tenir compte lorsque l'on essaie d'établir des extrapolations entre les divers cycles d'essai.

Le tableau III-4 présente des données concernant le moteur Caterpillar au méthanol ayant servi au projet MPMP, un moteur Volvo au méthanol à préinjection, des moteurs DDC et Deutz au méthanol à bougies de préchauffage, un moteur au méthanol MAN à allumage par étincelle et des moteurs Cummins L10 et DDC 8V-71 alimentés au méthanol additionné d'un accélérateur d'allumage (Avocet). Ce tableau présente également des données types concernant des moteurs diesel aux caractéristiques nominales similaires. Les moteurs au méthanol de Caterpillar, de Cummins et le moteur DDC à accélérateur d'allumage subirent des essais dans le cadre du programme MPMP. Le moteur Caterpillar fut soumis aux essais par Caterpillar, tandis que le moteur Cummins fut soumis aux essais par Ortech International et que le moteur DDC subit ses essais à l'Institut de recherche du Sud-Ouest. Les essais auxquels furent soumis les moteurs Cummins L 10 et DDC 8V-71 visaient à étudier les effets des variations de concentration d'Avocet sur les émanations. Les résultats relatifs aux autres moteurs sont extraits des données publiées, mais s'appliquent à des moteurs aux caractéristiques similaires chez un fabricant donné. Bien que l'on ne puisse établir de comparaisons dos à dos, le tableau III-4 offre une bonne indication des tendances relatives aux émanations en se fondant sur deux points de vue : changement de carburant (du diesel au méthanol) et changement de méthode d'essai (phases stables à phases transitoires).

On n'a pas pu établir de strictes comparaisons dos à dos entre les émanations d'hydrocarbures provenant des moteurs à carburant diesel et au méthanol puisque, jusqu'à tout récemment, la plupart des chercheurs ont mesuré les hydrocarbures issus du méthanol en se basant sur la norme appliquée au diesel, c'est-à-dire en utilisant un détecteur d'ionisation de flammes. Il a été démontré que ce procédé est moins sensible aux hydrocarbures oxygénés, c'est-à-dire au principal composant des hydrocarbures émis par un moteur au méthanol (38). Ce n'est que récemment que les fabricants de moteurs ont commencé à indiquer

les concentrations d'hydrocarbures en se servant de la formule pondérée de l'EMOH.

Tableau III-4. Résultats des essais, émanations de moteurs de véhicules lourds

MOTEUR	CYCLE D'ESSAI	NSHCPF (3)	NSCOPE	NSO_APF	NSSPF	NSaldPF
			(g/kW/h)			
MOTEURS DIESEL						
CATERPILLAR (1) 3406 DITA	13-M	0,27	1,45	11,43	ND	0,04
	TRAN	0,30	2,43	7,68	0,34	0,05
VOLVO T-100A	13-M	1,05	3,18	11,88 (6)	0,70 (5)	
	TRAN	1,14	4,03	11,18	0,70	
DDC 6V92TA (7)	TRAN	0,76	2,14	6,53	0,33	
DEUTZ F8L-513/11	TRAN	1,25	ND	12,51	0,46	
DDC (10) 8V71NA	13-M	1,34	10,19	10,72	ND	
	TRAN	2,41	5,63	10,72	1,07	
MOTEUR AU MÉTHANOL						
CATERPILLAR (2) 3406 DITA	13-M	3,81	8,75	4,13	ND	0,44
	TRAN	5,97 (4)	16,55	4,09	0,20	0,66
VOLVO T-100A	13-M	1,45	9,54	5,25	0,31 (5)	0,12 (5)
	TRAN	1,94	10,28	7,31	0,40	0,34
DDC 6V92TA (8) (avec catalyseur)	TRAN	0,94	2,7	3,08	0,11	0,11
	TRAN	0,13	0,27	3,08	0,04	0,05
DEUTZ F8L-513/11	TRAN	1,47	ND	5,21	0,16	ND
DDC w/7.5% Avocet 8V71NA (10)	13-M	1,74	11,26	10,05	ND	ND
	TRAN	2,28 (4)	3,75	10,86	0,84	0,23
MAN M2566LUH (9)	13-M	0,17	0,19	5,24	0,07	NA
CUMMINS L10, 3% Avocet	13-M	3,75	2,01	6,41	ND	0,17 (11)
5% Avocet		2,10	2,04	7,29	ND	0,17 (11)
7,5% Avocet		1,69	1,94	7,40	ND	0,15 (11)

NOTES:
(1) Moteur à puiss. nom. de 350 HP, 1 800 tr/min., commande électronique de l'alimentation
(2) Moteur à puiss. nom. de 350 HP, 2 100 tr/min., commande mécanique de l'alimentation
(3) Indiqué sur base diesel selon la méthode DIF à moins d'indication contraire
(4) Indiqué selon la méthodologie de l'EPA pour les hydrocarbures totaux
(5) Représente les données du cycle à 7 modes
(6) Compte non tenu du facteur de correction pour l'humidité à l'admission
(7) Modèle de fabrication de 1990 consommant du carburant diesel nº 1
(8) Moteur de production envisagé
(9) Muni d'un catalyseur
(10) Moteur à puiss. nom. de 198 kW alimenté au carb. diesel, 227 kW alimenté au mélange méthanol-Avocet
(11) Représente le niv. spécifique de formaldéhyde en fonction de la puissance au frein
Réf. (12, 20, 39, 40, 41, 42, 59)

Comme dans le cas des moteurs diesel, il est probable que le cycle d'essai à phases transitoires appliqué aux moteurs au méthanol aura pour effet d'accroître les valeurs applicables aux hydrocarbures par rapport aux valeurs indiquées lors du cycle à 13 modes. On peut s'y attendre en raison des températures de fonctionnement d'ensemble plus faibles qui prévalent pendant le cycle d'essai, auxquelles s'ajoutent des charges de fonctionnement généralement plus faibles. Le fait que la chaleur de vaporisation du méthanol soit plus élevée contribue au rafraîchissement des températures de fonctionnement. Lorsque les concentrations d'Avocet étaient faibles, on a observé des défauts d'allumage tant dans les moteurs Cummins que dans les moteurs DDC, ce qui démontre combien il est difficile d'obtenir l'auto-allumage (39, 59). Dans le cas du Cummins L 10, c'est au ralenti et à faible charge que l'on a enregistré les concentrations d'hydrocarbures les plus élevées (39). Lorsqu'on augmente la charge et la vitesse, la chaleur engendrée dans la chambre de combustion suffit à amorcer l'allumage. En conséquence, le volume d'additif accélérateur d'allumage joue un rôle important dans la prédiction des concentrations d'hydrocarbures. Aux points de fonctionnement médians et supérieurs, la variation des concentrations d'additif n'exerce aucun effet significatif sur les émanations d'hydrocarbures. Néammoins, la quantité exacte d'additif nécessaire varie en fonction du type de moteur.

Si l'on se base sur la gamme de concentrations méthanol-Avocet mises à l'essai, on constate que le mélange comprenant 5 p. cent d'Avocet constitue le niveau optimal pour le moteur Cummins L 10 et celui de 7,5 p. cent le niveau optimal pour le moteur DDC. Malheureusement, on ne dispose pas de données sur les essais à phases transitoires sur le Cummins L 10 au méthanol ou au carburant diesel pour effectuer des comparaisons dos à dos.

Si on les compare aux émanations provenant des moteurs diesel, les émanations d'oxydes d'azote provenant des moteurs au méthanol ont tendance à être plus faibles en raison de la très forte chaleur de vaporisation du méthanol comparée à celle du carburant diesel. Les recherches effectuées sur les concentrations d'oxydes d'azote émanant des moteurs diesel en cycle d'essai à phases transitoires ou stables (13 modes), ont démontré que les concentrations d'oxydes d'azote ont tendance à demeurer relativement stables quels que soient les cycles d'essai utilisés (36, 37). Ce résultat a été attribué au fait que les charges étaient généralement plus faibles lors des essais à phases transitoires et que, même si la faiblesse de la charge tend à faire grimper les concentrations

d'oxydes d'azote, la baisse de température de fonctionnement d'ensemble du moteur qui en résulte compense cet effet. Cependant, dans le cas du moteur au méthanol, le recours aux aides à l'allumage tels que les bougies de préchauffage, l'allumage par étincelle, la préinjection ou les accélérateurs d'allumage vise à amorcer le processus de combustion, surtout en présence de faibles charges. L'emploi d'aides à l'allumage peut contrebalancer les réductions de concentrations d'oxydes d'azote. Les résultats obtenus avec le moteur Cummins L 10 à allumage accéléré illustrent ce phénomène. Par comparaison avec le carburant diesel, l'augmentation des quantités d'Avocet avait pour effet de réduire le temps d'allumage et de provoquer une combustion hâtive par comparaison au moteur diesel à réglage de l'injection identique (59). Lorsque la charge s'élève, la plus forte alimentation en carburant provoque une hausse des concentrations d'oxydes d'azote plus rapide que celle de la puissance développée. À ces niveaux de puissance et de charge, il n'était pas nécessaire d'augmenter les quantités d'accélérateur d'allumage (ce qui est corroboré par les taux d'hydrocarbures) puisque cela n'aurait probablement fait que favoriser une progression plus rapide de la réaction de combustion, donc d'élever encore davantage les concentrations d'oxydes d'azote et la température à l'intérieur des cylindres. Quoi qu'il en soit, on ne sait pas dans quelles proportions les ingrédients contenus dans l'Avocet contribuent à réduire ou augmenter les concentrations d'oxydes d'azote.

Les émanations d'oxyde de carbone peuvent être déterminées par le rapport air/carburant, ces émanations tendant à décroître en fonction de l'appauvrissement du rapport air/carburant. Toutefois, le taux de réduction n'est pas linéaire et peut être affecté par les particularités du moteur. Le rapport stoechiométrique air/carburant est d'environ 6,5/1 dans le cas du méthanol et d'environ 15/1 pour le carburant diesel. Lorsque l'on compare les résultats de divers cycles d'essai, on constate que le cycle d'essai à phases transitoires convient mieux à l'observation du comportement du moteur, surtout s'il s'agit d'un moteur turbocompressé. Contrairement aux moteurs diesel, les moteurs au méthanol ne sont pas sensibles aux émanations de solides issues du carburant. C'est pourquoi le moteur n'a pas nécessairement besoin d'un limiteur de carburant (ou de fumée).

En phases transitoires, le supplément de carburant que reçoit un moteur au méthanol tend à faire grimper les concentrations de CO, ce qui n'est pas le cas en phases stables.

Il a été démontré que les émanations de particules provenant des moteurs au méthanol sont beaucoup plus faibles que celles provenant des moteurs diesel équivalents. À mesure qu'on améliorera les moteurs diesel, la proportion de particules attribuée au carburant diesel tendra à diminuer, surtout si l'on réduit la teneur en soufre du carburant. Il a en effet été prouvé que la production de particules est proportionnelle à la teneur en soufre (55). Si l'on veut réduire encore plus les dégagements de particules, il sera essentiel de doser efficacement la quantité d'huile lubrifiante pénétrant dans la chambre de combustion. Les moteurs alimentés au méthanol offrent l'avantage de réduire de beaucoup les concentrations de particules émanant du carburant dans les gaz d'échappement. Les futures configurations de moteurs au méthanol doivent donc comporter des améliorations visant à réduire la consommation d'huile lubrifiante.

Les résultats des essais pratiqués sur les moteurs DDC permettent de comparer l'état actuel du développement des moteurs alimentés au méthanol et au carburant diesel. La société DDC est le principal fournisseur de moteurs d'autobus de transport en commun du marché nord-américain. Les résultats obtenus pour la version diesel de 1990 ne pourront être conformes aux normes 1991 des États-Unis et de la Californie relatives aux émanations des autobus urbains en raison de leurs niveaux trop élevés de particules. Par contre, le programme de développement du moteur au méthanol permetra de répondre aux exigences des normes de 1991. DDC a annoncé qu'elle avait l'intention de vendre son moteur au méthanol à partir de l'année de fabrication 1991 (83).

IV PERFECTIONNEMENT DE LA TECHNOLOGIE DU DIESEL

A. INTRODUCTION

Dans cette section, nous allons décrire et expliquer les perfectionnements qui ont été apportés aux moteurs diesel dans le but de satisfaire les normes de l'EPA qui entreront en vigueur en 1991 et 1994, et faire ressortir les tendances qui se manifestent. La publication de ces normes a tout d'abord soulevé un émoi considérable chez les constructeurs de moteurs diesel, certains y voyant même la fin du moteur diesel comme moyen de propulsion des véhicules. Cette annonce a aussi eu des effets en dehors des États-Unis puisque de nombreux fabricants européens et japonais exportent des moteurs vers le vaste marché des États-Unis. De plus, les autres pays considèrent que les États-Unis jouent un rôle de chef de file en matière de réglementation sur les émanations, et ont tendance à copier les mesures qu'ils adoptent en ce sens. Il en a résulté un mouvement d'intérêt pour les carburants de rechange, en particulier pour le méthanol et l'éthanol et, plus tard, pour le gaz naturel.

Cette annonce eut pour second résultat une demande de changement dans la composition des carburants diesel courants pour véhicules automobiles, surtout en ce qui concerne leur teneur en soufre. Pendant quelque temps, une controverse opposa les fabricants de moteurs et les sociétés pétrolières. Les fabricants prétendaient qu'il leur était impossible de se conformer aux normes s'ils ne disposaient pas de carburants de meilleure qualité, tandis que les sociétés pétrolières prétendaient que la production de meilleurs carburants serait trop coûteuse et qu'il appartenait donc aux fabricants de concevoir des moteurs capables d'utiliser les carburants dotés des caractéristiques actuelles.

Éventuellement, les parties finirent par trouver un terrain d'entente. D'une part, les sociétés pétrolières ont décidé de produire des carburants à faible teneur en soufre et, d'autre part, les fabricants de moteurs ont commencé depuis peu à divulgueur les résultats de leurs recherches intensives visant à réduire les émanations provenant des moteurs diesel. Le faible niveau de particules prescrit dans les règlements relatifs à 1994 vise à stimuler le développement de filtres ou de "pièges" destinés à capter les matières solides en suspension dans les gaz d'échappement. Les États-Unis et beaucoup d'autres pays ont entrepris des

recherches et des essais portant sur les pièges à particules. Il semble très évident que cette méthode de limitation de la pollution est pratique et efficace.

La nouvelle génération de moteurs diesel "propres", qui est en pleine évolution, pourra peut-être satisfaire les normes antipollution de 1994 sans qu'il soit nécessaire de les doter de pièges filtrants pour capter les particules contenues dans les gaz d'échappement. Cependant, si cela n'est pas possible en pratique, en raison de la nécessité de tenir compte des modifications à apporter aux chaînes de fabrication, on pourra recourir aux pièges à particules pour remédier aux déficiences. Les exploitants de parcs et l'industrie du diesel en général préféreraient de beaucoup continuer à utiliser le moteur diesel pour la propulsion des véhicules lourds à court et à moyen termes.

B. SOMMAIRE

Les techniques de réduction des émanations utilisées peuvent être commodément divisées en trois groupes principaux :

- modifications du moteur;
- traitement ultérieur des gaz d'échappement;
- reformulation du carburant diesel.

Les modifications du moteur comprennent l'injection à haute pression de façon à améliorer le mélange de carburant, la variation de la turbocompression de suralimentation et du refroidissement de la charge, et la limitation de l'entrée d'huile lubrifiante dans la chambre de combustion. Les dispositifs de régulation et de commande électroniques du moteur qui, à l'avenir, vont devenir des composants standard, fournissent de bien meilleurs moyens de coordonner les paramètres de fonctionnement du moteur que les systèmes mécaniques. La plupart des caractéristiques qui serviront à satisfaire les normes de 1994 de l'EPA sont déjà incorporées aux moteurs de conception récente. On continuera à l'avenir à raffiner encore plus le rendement des composants et les techniques de commande électronique.

Bien des pays ont effectué des essais sur les dispositifs de traitement ultérieur des gaz d'échappement et de nombreux parcs les ont adopté sur une large échelle. On se sert d'éléments filtrants ou de "pièges" pour éliminer les

particules de carbone. L'élimination des particules et l'emploi de carburants à faible teneur en soufre permettent d'utiliser des catalyseurs pour réduire les autres polluants des gaz d'échappement tels que le CO et les HC. Les pièges à particules sont capables de s'autonettoyer ou de se regénérer grâce à un procédé de combustion des dépôts de carbone. Généralement, la combustion est amorcée et assistée par une source de chaleur auxiliaire telle qu'une flamme alimentée au carburant diesel ou tel qu'un dispositif électrique.

L'un des grands avantages des dispositifs de traitement ultérieur des gaz d'échappement tient à leur capacité de réduire les émanations provenant du véhicule et du moteur déjà en place. Ces dispositifs ont été longuement mis à l'essai dans plusieurs parcs de véhicules et, suite à ces essais, ont fait l'objet de nombreuses commandes de pièges à particules (par exemple, pour équiper 400 autobus de la ville de New York).

Plusieurs fabricants européens tels que Deutz et Volvo ont mis au point et commercialisé, à titre d'essai, des pièges à particules. Les fabricants américains se sont, eux aussi, lancés dans l'étude des pièges. La société DDC a subventionné des essais de pièges sur ses moteurs d'autobus, dont elle a approuvé et publié certains des résultats (40). Ces travaux ayant donné des résultats assez probants, DDC a fait savoir que, à la fin de 1991, sa gamme de moteurs d'autobus pourrait être équipée de pièges sur une base commerciale.

On utilise beaucoup les pièges sur les moteurs diesel fonctionnant dans les mines souterraines et, à l'avenir, on les utilisera sur les véhicules routiers. Le système de régénération active, que ce soit au moyen d'un brûleur au carburant diesel ou d'un dispositif de chauffage électrique, va probablement prédominer. Ce système est universellement applicable et ne dépend pas du cycle opératoire du moteur pour assurer une régénération complète. On n'a pas encore entièrement prouvé aux exploitants de véhicules lourds que le piège pouvait offrir une durabilité raisonnable sur de longues distances, mais les essais qui se poursuivent permettent d'accumuler chaque jour un peu plus d'expérience. Il semble qu'aucune raison fondamentale ne devrait empêcher les pièges d'offrir la fiabilité nécessaire à long terme.

Les mesures adoptées par l'EPA et les autres corps législatifs vont beaucoup influencer l'utilisation future des pièges et des catalyseurs. Beaucoup de fabricants de moteurs et de véhicules espèrent pouvoir éviter l'utilisation des

pièges en 1994 en parvenant à obtenir les niveaux de dépollution voulus au moyen des seules modifications du moteur. Néammoins, entre temps, il se peut que l'on exige que les véhicules existants soient munis de pièges. Et, quelque temps après 1994, les nouveaux véhicules seront astreints à des normes antipollution encore plus sévères. L'EPA s'est délibérément servie des règlements applicables en 1991 et 1994 pour forcer les fabricants à améliorer leur technologie, sachant que ceux-ci auraient pu être obligés d'utiliser des pièges à particules. En fait, il se peut que l'industrie du diesel parvienne à atteindre les normes de 1994 sans recourir à l'usage de pièges et de catalyseurs, mais à cette date, il est improbable que les organismes responsables ne tiennent pas compte des possibilités de réduire encore plus les émanations polluantes et n'exigent pas leur emploi au cours des années ultérieures.

La reformulation du carburant diesel a surtout pour objet d'abaisser la teneur en soufre à un maximum de 0,05 %. Le carburant diesel à faible teneur en soufre sera disponible au Canada et aux États-Unis en 1994, en attendant l'adoption finale de lois appropriées dans les deux pays. La réduction de la teneur en composés aromatiques du carburant diesel présente également un avantage à certains égards, mais le coût total que représenterait une réduction de le teneur aromatique au niveau de 10 % qui a été suggérée serait très élevé. La modification des procédés de raffinage que cela représenterait serait beaucoup plus coûteuse et étendue que la désulfuration seule.

Les modifications apportées aux véhicules, y compris le montage de pièges à particules, seront très visibles par les utilisateurs. Les pièges fonctionnent automatiquement et les modifications internes du moteur n'affectent ni la facilité de conduite, ni la puissance ni la fiabilité du véhicule. La configuration des véhicules et leur capacité de charge utile ne changeront pas. Les pièges à particules modernes peuvent se substituer directement aux silencieux classiques.

L'EPA a proposé les normes antipollution de 1991 et 1994 relatives aux moteurs diesel de façon à forcer les fabricants à mettre au point des moteurs de véhicules plus propres. Certaines organisations, particulièrement en Californie, ont profité de cette situation pour demander que l'on remplace le carburant diesel par des carburants de substitution tels que le méthanol. L'EPA n'essaie pas de mettre de l'avant une technologie particulière, mais elle est obligée d'exiger à la fois une réduction des émanations polluantes des moteurs et l'utilisation d'un carburant diesel à faible teneur en soufre (0,05 %) à indice

minimal de cétane de 40. Si les raffineries ne peuvent produire ce meilleur carburant, l'utilisation des moteurs diesel sera effectivement interdite.

On estime que l'augmentation des coûts résultant de la désulfuration au Canada et aux États-Unis sera de l'ordre de 10 à 20 %, soit 2 à 4 cents de litre selon les régions. Les fabricants ne sont pas prêts à faire des prévisions quant aux coûts des nouveaux moteurs; ils se contentent d'utiliser des termes tels que "concurrentiel" et "comparable au coût actuel". On estime que le prix d'achat d'un moteur va augmenter de 10 à 15 %, soit de 2 000 à 3 000 $ pour un moteur de 25 000 $, sans compter les dispositifs de traitement ultérieur des gaz d'échappement. Les pièges à particules coûtent environ 10 000 $, mais l'un des principaux fabricants américains a déclaré que ce prix pourrait descendre aux environs de 4 000 $ en 1994 si l'on recourait à une production de masse.

C. CONFIGURATION DU MOTEUR

Les dispositifs de commande électronique par microprocesseur

La commande électronique des moteurs diesel est un procédé de plus en plus courant qui, éventuellement, remplacera la commande mécanique, de même que les dispositifs d'injection à commande électronique ont remplacé les carburateurs sur les moteurs à essence des automobiles. La transition se fera probablement sur une période d'une durée similaire, c'est-à-dire environ dix ans, ce qui signifie que, vers l'an 2000, la majorité des moteurs diesel des véhicules lourds et légers utilisés sera dotée de dispositifs de commande électronique.

Le dispositif de commande électronique de Detroit Diesel (DDEC) en est un exemple. Il a d'abord été offert en option en 1985. La seconde version (DDEC2), commercialisée en 1988, était plus compacte et plus simple tout en étant capable de traiter beaucoup plus de données relatives au moteur d'une façon plus rapide et plus précise. C'est maintenant un dispositif de série qui équipe la version autobus de transport en commun du moteur à deux temps de la série 92 de Detroit Diesel. Le nouveau moteur à quatre temps de DDC (série 60) a été conçu à l'origine pour être doté de ce dispositif et n'est plus disposnible avec régulation mécanique. Ce moteur est disponible en versions à deux cylindres et des puissances au frein allant de 250 à 425 HP. Le nouveau moteur

Caterpillar "3176" est un peu plus petit; il convient aux camions poids moyens et développe une puissance au frein de 200 à 300 HP. Il est doté de série du dispositif programmable de commande électrique du moteur (PEEC) de Caterpillar. Ces deux moteurs peuvent satisfaire les normes antipollution de 1991 de l'EPA relatives aux camions sans traitement ultérieur des gaz d'échappement. La commande électronique est l'élément de coordination qui permet d'exploiter au maximum les autres modifications du moteur et les dispositifs de traitement ultérieur des gaz d'échappement.

L'injection à haute pression

L'augmentation de la pression d'injection du carburant favorise sa pulvérisation complète et la pénétration des jets dans l'air environnant, ces deux effets ayant pour conséquence de rendre la combustion plus complète. Cela permet aussi d'obtenir un débit plus élevé de carburant, ce qui offre au concepteur la possibilité d'injecter une quantité donnée de carburant en moins de temps ou plus de latitude pour régler l'injection.

Tous les fabricants ont adopté les systèmes d'injection à haute pression. Dans les moteurs DDC de la série 60, la pression peut aller jusqu'à 23 000 lb/po^2. Dans la nouvelle gamme de moteurs Cummins les pressions d'injection vont passer de l'actuel niveau de 14 000 à 21 000 lb/po^2. En adoptant les sytèmes à haute pression, les fabricants ont eu tendance à utiliser aussi la combinaison pompe-injecteur. Ce genre de système d'injection permet d'éviter les difficultés potentielles résultant de la propagation de l'onde de pression dans les longues tubulures d'alimentation à haute pression qui relient la pompe aux injecteurs, difficultés découlant de la dilatation de la tubulure elle-même et de la compressibilité du fluide. Ce phénomène peut rendre plus difficile le calage précis de l'injection. Caterpillar a commencé à utiliser des ensembles pompe-injecteur pour la première fois sur un moteur de camion du type 3176 et continue à le faire sur une nouvelle gamme de moteurs plus petits destinés aux camionnettes et aux poids moyens. La société Lucas, l'un des principaux fabricants de pompes d'injection des types en ligne et rotatif, a mis en marché une gamme de blocs d'injection électroniques destinés, comme elle le déclare, à la prochaine génération de moteurs diesel.

La société Robert Bosch a entrepris d'importantes recherches sur les deux types de systèmes d'injection. Elle a démontré que des pressions d'injection plus

élevées et la commande électronique pouvaient aussi être utilisées avec succès dans un système distinct comportant pompe et injecteur. La société Ricardo Engineering Ltd. a elle aussi effectué des recherches sur l'injection à haute pression en montant un bloc pompe-injecteur distinct de marque Bosch sur un moteur de camion Volvo de 12 litres (60, 61). On observa que ce système à haute pression contribuait grandement à neutraliser l'effet compensatoire entre les émanations d'oxydes d'azote et de particules. La société Ricardo a aussi étudié l'effet produit par un ensemble d'autres caractéristiques antipollution tels que la turbocompression. la turbulence de l'air, le refroidissement de la charge et la limitation de la pénétration d'huile lubrifiante. Les normes de 1991 de l'EPA relatives aux émanations des camions ont été atteintes à l'aide d'un carburant à teneur en soufre de 0,05 %. La société Ricardo estime que l'on pourrait atteindre les objectifs de 1994 en modifiant encore plus la configuration des moteurs. On pourrait utiliser le traitement ultérieur des gaz d'échappement pour obtenir les marges nécessaires aux tolérances de fabrication lors de la production de masse.

Dans les systèmes d'injection classiques, la pression est proportionnelle à la vitesse et à la charge au moteur, de sorte qu'il n'est pas possible d'atteindre les niveaux de crête aux basses vitesses. Navistar International s'est servie d'un multiplicateur de pression d'huile pour obtenir une pression allant jusqu'à 18 000 lb/po^2 dans les 60 % du haut de la gamme de vitesses du moteur sur une version de son moteur diesel à six cylindres de 466 po^3. Ce moteur est doté d'une combinaison de modifications avancées destinées à lui permettre d'être conforme aux normes de 1994 sur les émanations. Les concentrations de particules sortant du moteur sont assez faibles pour permettre le recours à un convertisseur catalytique destiné à réduire les émanations de HC et de CO sans qu'il soit nécessaire de recourir à un piège à particules. Navistar procède actuellement à des démonstrations portant sur un camion équipé de ce moteur à l'intention des organisations intéressées du Canada et des États-unis (62).

La limitation de l'entrée d'huile lubrifiante

Les limitations imposées par L'EPA pour les années 1991 et 1994 relativement aux émanations de particules sont si sévères que la quantité d'huile qui pénètre dans la chambre de combustion présente un problème important. La proportion de particules générées de cette façon peut varier entre 25 et 70 % du total en fonction de la vitesse et de la charge au moteur (63, 64).

Les moteurs diesel de véhicules lourds consomment de l'huile au taux approximatif de 0,2 % du débit nominal de carburant d'alimentation (65). Les ingénieurs de Ricardo Consulting ont estimé qu'il faut réduire la consommation d'huile selon un facteur 4 pour atteindre les objectifs de 1991 relativement aux dégagements de particules par les camions. La société Cummins prévoit une réduction progressive de la consommation d'huile par le moteur en la faisant passer de la moyenne actuelle d'un litre/3 000 km à un litre/6 000 km d'ici 1991, et à un litre/12 000 km d'ici 1994. Les fabricants essaient de résoudre ce problème en diminuant les tolérances applicables aux pistons, aux segments et aux alésages tout en apportant des modifications de détail à la forme des segments. Il est également possible de réduire la consommation d'huile en abaissant la vitesse nominale du moteur.

Navistar déclare qu'elle a pu réduire de façon significative les émanations de polluants en plaçant le segment de feu beaucoup plus près du haut du piston qu'il ne se trouve habituellement dans les moteurs diesel. Elle a aussi éliminé le mouvement des segments de piston grâce à une étude intensive de l'espacement et de la configuration des pistons. La position du segment de feu permet de réduire le volume de gaz qui se situe dans la partie angulaire autour de la tête de piston car, à cet endroit, le mélange gazeux ne s'intègre pas bien au processus de combustion principal, ce qui contribue à la non complétude de la combustion. Par ailleurs, l'amélioration du jeu de segments inférieur réduit le transfert d'huile. Navistar utilise aussi des joints de tiges de soupapes hautement efficaces tant sur les soupapes d'admission que d'échappement. Il a été démontré que l'amélioration du jeu de segments permet de réduire de 30 % les dégagements de particules comparativement à la configuration normale, et que les joints de soupapes améliorés offrent une réduction de 15 % comparativement aux moteurs dépourvus de ces joints.

L'injection directe

Rien n'indique que les fabricants essaient de revenir à l'injection indirecte dans les moteurs diesel de véhicules lourds. Tous les concepteurs et fabricants semblent être d'accord avec la société Ricardo Consulting selon laquelle l'injection directe peut répondre aux exigences de l'EPA relatives à 1991 lorsqu'on utilise ce procédé en conjonction avec les plus récentes améliorations touchant la turbocompression et le refroidissement de la charge, et que l'on adopte la culasse à quatre soupapes.

La turbocompression et le refroidissement de la charge

Pour satisfaire les normes de 1991 et de 1994, les moteurs des autobus et des camions lourds devront être dotés d'un turbocompresseur et d'un refroidisseur secondaire air-air. Le refroidissement de la charge d'air par l'air a remplacé le refroidissement à l'eau en raison de sa capacité d'atteindre les basses températures de l'air d'admission, donc d'accroître la densité de la charge. En outre, il est possible de maintenir la température de combustion de crête à un niveau moindre si la charge d'air d'admission est aussi fraîche que possible, ce qui exerce un effet important sur la formation d'oxydes d'azote. On peut tirer profit de l'installation d'un turbocompresseur en munissant le moteur d'un dispositif de commande électronique et de boucles de rétroaction et en utilisant des pales à géométrie variable pour moduler le débit d'air selon les besoins. Cette technologie nécessite des commandes sophistiquées et une fabrication de haute précision, mais les résulats obtenus sont prometteurs puisqu'ils permettent de réduire les dégagements de HC, de fumée et de particules, sans augmentation des concentrations d'oxydes d'azote (66).

Le recyclage des gaz d'échappement

L'Institut japonais de sécurité de la circulation a commandité des travaux sur un moteur de 11,6 litres au cours desquels on a pu démontrer qu'il était possible de réduire de plus de 50 % les concentrations d'oxydes d'azote en faisant appel au recyclage des gaz d'échappement (67). Une réduction de 30 % de l'oxygène disponible dans le courant d'air d'admission a virtuellement éliminé la production d'oxydes d'azote. Toutefois, il a été également démontré qu'une réduction de l'oxygène dépassant 15 % faisait rapidement augmenter le débit de CO. En recyclant les gaz et en améliorant le système de régulation on a pu maintenir les augmentations des teneurs en HC et en CO à de très faibles niveaux, sans pour autant augmenter significativement la consommation de carburant. L'Institut poursuit d'autres recherches en ce domaine, particulièrement en ce qui a trait aux effets à long terme sur l'usure de l'alésage des cylindres.

Les bougies de préchauffage

Navistar International a proposé que l'on réduise la formation d'oxydes d'azote en utilisant des bougies de préchauffage pour raccourcir la période d'inflammation du carburant en situations de charge partielle. Cette société prévoit également pouvoir réduire les niveaux de HC. Navistar n'a pas encore entrepris d'essais significatifs relativement à ce concept et prévoit certaines difficultés ayant trait à la durée de vie des bougies de préchauffage et à la demande en courant électrique. Il semble cependant qu'aucun obstacle particulier ne s'oppose au développement de la bougie de préchauffage. Les bougies existantes se sont révélées peu fiables dans les moteurs alimentés à l'alcool, mais cela provient du fait qu'elles n'étaient pas destinées au service continu dans les chambres de combustion ouvertes des moteurs à injection directe.

D. LE TRAITEMENT ULTÉRIEUR DES GAZ D'ÉCHAPPEMENT

Les pièges à particules

Un piège à particules ressemble à un silencieux d'échappement et se compose de quatre éléments fondamentaux : un filtre à carbone, un dispositif de chauffage pour la régénération, un boîtier destiné à acheminer les gaz d'échappement et à renfermer le filtre et le dispositif de chauffage, et un dispositif de commande servant à amorcer et à commander la régénération. L'élément filtrant fait également effet d'amortisseur de bruit, de sorte que le piège peut aussi servir à remplacer directement le silencieux du véhicule.

Un piège à particules élémentaire n'est capable que de filter les particules de carbone et n'exerce aucun effet sur les émanations gazeuses (CO et oxydes d'azote). L'élément filtrant ne peut éliminer les particules d'une grosseur inférieure à une certaine taille ou tous les hydocarbures solubles. Toutefois, il peut éliminer jusqu'à plus de 90 % des matières solides et, ce faisant, le piège offre la possibilité de faire subir un traitement catalytique aux autres polluants. Les éléments filtrants sont normalement constitués de composés à base de céramique capables de résister aux fortes températures dégagées. On peut utiliser de la laine minérale et de la mousse céramique, mais, en pratique, tous les pièges actuels sont dotés de matrices moulées, exactement comme dans le

cas des convertisseurs catalytiques d'automobiles, à cette exception près que l'on obstrue les voies de passage alternatives afin de créer un filtre en labyrinthe (68). Ce sont les sociétés Corning et NGK qui fournissent presque tous les éléments filtrants des matrices. Les chercheurs étudient les questions relatives à la durabilité et à l'intégrité structurale des éléments filtrants soumis à des milliers de cycles de régénération à haute température. Il semble qu'aucun problème insurmontable ne se manifeste à ce sujet (69, 70, 71).

On parvient à une combustion complète ou à la régénération en utilisant un brûleur auxiliaire pour amorcer la combustion. À cette fin, on utilise généralement un brûleur alimenté au carburant diesel, mais les dispositifs de chauffage électrique sont aussi beaucoup utilisés. La société Donaldson, l'un des principaux fabricants de pièges des États-Unis, offre les deux types de dispositifs (72). On peut aussi utiliser la chaleur des gaz d'échappement aux seules fins d'amorcer la régénération (régénération "passive"). Les gaz d'échappement traversent une soupape d'étranglement qui agit comme un chalumeau sur l'élément filtrant. L'allumage se perpétue de lui-même et un front de flamme se déplace à travers l'élément, la combustion étant entretenue par l'excédent d'air admis par une soupape de dosage selon les besoins. L'efficacité de la régénération passive est parfois limitée, surtout lorsque le moteur est froid ou que la demande de puissance est faible. On peut recourir à un catalyseur pour favoriser la combustion du carbone aux faibles températures, que ce soit au moyen d'un additif versé dans le carburant ou de la pose d'un revêtement sur l'élément filtrant.

Les sociétés Webasto, Detroit Diesel/ORTECH, Deutz, FEV et IVECO utilisent des brûleurs (régénération active). Un parc d'autobus de la ville d'Athènes, munis de pièges mis au point par l'Université de Thessalonique, utilise la méthode passive (74). Les sociétés Mitsubishi (75) et Nippon Shokubai (76) effectuent également des essais sur des systèmes passifs. Les autobus d'Athènes incorporent environ 100 ppm de naphténate céreux dans le carburant diesel pour le faire agir comme catalyseur aux faibles températures de régénération. On indique que cet additif ne produit aucun effet ni émanations nocifs et que son coût est minime. Les systèmes actifs requièrent un apport d'énergie, que ce soit sous la forme d'une consommation additionnelle de carburant ou d'un fort courant électrique, ce qui se traduit par une augmentation de la consommation moyenne de carburant. Suite aux essais en pratique, on fait état d'augmentations de la consommation allant de 1 à 8 %.

Volvo a lancé un système destiné aux autobus et véhicules urbains dans lequel l'élément filtrant est assez grand pour durer toute une journée d'utilisation sans forte augmentation de la contre-pression des gaz d'échappement (77). La régénération s'effectue grâce à un élément chauffant de 220 V et à une pompe à air. À la fin de sa journée de travail, le conducteur raccorde l'autobus au secteur électrique et le système se régénère automatiquement. Ce système offre l'avantage de ne pas nécessiter de commandes automatiques de bord, donc d'éliminer certains coûts et les problèmes d'entretien qui en résulteraient. De plus, il offre la possibilité de régénérer les filtres dans des conditions plus faciles à régler et à un taux de combustion plus lent. Volvo a équipé environ 100 camions et 30 autobus suédois de ces pièges au cours de la dernière année, mais leur coût élevé (de 30 000 à 70 000 couronnes suédoises, soit 6 000 à 13 500 dollars canadiens) décourage de nombreux acheteurs éventuels. Les véhicules individuels munis de filtres ont parcouru des distances supérieures à 170 000 km sans éprouver de sérieuses difficultés. L'élément filtrant est doté d'un revêtement catalytique qui permet de réduire les émanations de CO et de HC aux fortes températures d'échappement. On peut utiliser l'élément de 220 V pour préchauffer le filtre avant de commencer à réduire les niveaux d'émanations lors du démarrage à froid et du réchauffage.

On utilise souvent les pièges à particules par paires. Les gaz d'échappement traversent l'un des pièges jusqu'à saturation, puis ils sont dirigés vers le second piège pendant la régénération du premier. Le système mis au point par Detroit Diesel/ORTECH, qui subit actuellement des essais à New York, en est un exemple (73). L'expérience a prouvé qu'il n'était peut-être pas nécessaire de disposer de deux pièges. On se sert davantage du système à piège unique, en le munissant parfois d'une dérivation destinée à intervenir en cas de défaillance du processus de régénération et d'obstruction excessive du filtre. Le système Deutz en est un bon exemple (82). Tout d'abord, la société Deutz utilisa un silencieux de dérivation pour intervenir en cas d'obstruction du piège, mais constata que cette solution présentait certains inconvénients dûs notamment à la fiabilité de la soupape de commande et aux dimensions d'ensemble du système. Ces inconvénients amenèrent Deutz à abandonner la dérivation et à améliorer la fiabilité du piège lui-même et du brûleur. Il en est résulté un piège unique compact et simple qui subit des essais depuis 1988. Ces essais ont réussi et le ministère allemand de l'Environnement envisage d'en équiper 1 500 autobus dans le but d'effectuer un programme d'essais pratiques à grande échelle.

Les systèmes de commande des pièges

Le système de commande d'un piège à particules doit activer le processus de régénération et assurer sa continuité jusqu'à ce que le filtre soit assez propre pour le cycle d'utilisation suivant. Les fonctions secondaires du système de commande peuvent inclure le passage d'un piège à l'autre dans un système à double piège, le lancement et la modulation du dispositif de chauffage électrique ou au carburant Diesel, ou, dans un système à régénération passive, l'étranglement des gaz d'échappement.

La plupart des systèmes utilisent la contre-pression des gaz d'échappement comme signal primaire de mise en route du processus de régénération. Si on laisse le filtre se surcharger, le moteur peut surchauffer et subir des dommages. On utilise les signaux provenant des températures du filtre et des gaz d'échappement pour moduler la combustion du carbone en maintenant le piège assez chaud pour favoriser une combustion complète, mais assez frais pour en assurer la sécurité et la fiabilité. Les hausses désordonnées de température du moteur ou du filtre provoquent l'arrêt du moteur ou du brûleur ou des deux appareils. Il est nécessaire d'utiliser un signal de vitesse du moteur car certaines contre-pressions sont acceptables lorsque le moteur tourne à certaines vitesses. Il est souhaitable de faire fonctionner le système aux valeurs de contre-pression permissibles les plus élevées étant donné que l'efficacité du filtre augmente en fonction de l'augmentation de la contre-pression.

Si le cycle opératoire du moteur est prévisible, il se peut que la régénération soit programmée selon un horaire. Le système de régénération quotidienne de Volvo constitue peut-être l'exemple extrême de ce principe. Les sociétés General Motors (78) et FEV (79) se sont servies d'algorithmes du débit du carburant et de la vitesse du moteur pour calculer la charge au moteur et, de là, le taux de régénération des particules pour ensuite s'en servir pour prédire les besoins de régénération.

Les catalyseurs de gaz d'échappement

On étudie le traitement catalytique des gaz d'échappement des moteurs Diesel pour deux raisons. La première est de permettre la régénération des filtres des pièges à particules aux basses températures de façon à réduire les risques d'endommagement dû à la chaleur. La seconde est de permettre l'oxydation des

émanations de CO et de HC. On peut introduire le catalyseur sous forme de revêtement appliqué sur le filtre ou sous forme d'additif au carburant. La société Mitsubishi s'est servie d'un filtre enduit d'un catalyseur au platine pour ses essais sur un camion équipé d'un moteur de 6,5 litres (75). La régénération de type passif s'avéra efficace lorsque les gaz d'échappement étaient adéquatement chauffés, mais Mitsubishi a conclu qu'un camion ou un autobus en service normal ne pouvait dégager assez de chaleur pour assurer une régénération totale uniforme. Il en résulterait un colmatage additionnel du filtre et une baisse correspondante du rendement du véhicule.

La ville d'Athènes dispose de 120 autobus munis de pièges à particules conçus par l'Université de Thessalonique. On ajoute 50 à 100 ppm de naphténate céreux (CeO2) au carburant diesel pour assurer la régénération à des températures variant entre 500° et 600° C. Un autre groupe de 100 autobus doit être muni du même genre de dispositif (74).

On utilise aussi des catalyseurs pour réduire les émanations de CO et de HC sur un autobus exploité par les services de transport en commun de la ville de New York. Cet autobus est muni d'un système à double piège mis au point par ORTECH International. Le système comprend deux filtres Corning de 11,25 x 12 po revêtus d'un catalyseur dont la formule a été conçue par la société Engelhard. La régénération est effectuée par deux brûleurs à carburant diesel et se déroule alternativement dans chacun des pièges. Selon ce qui a été publié, la réduction d'ensemble des particules est de 80 %, tandis que le revêtement catalyseur assure une réduction de 60 % du CO et de 50 % des HC. Le carburant diesel utilisé est du type à faible teneur en soufre (moins de 0,05 %) (73).

E. LA REFORMULATION DU CARBURANT DIESEL

La reformulation du carburant diesel vise à en modifier les teneurs en soufre et en hydrocarbures aromatiques ainsi que l'indice de cétane. On doit réduire les teneurs en soufre et en hydrocarbures aromatiques pour obtenir une réduction de leurs concentrations dans les émanations. L'indice de cétane, dont dépend la qualité de l'auto-allumage, doit être maintenu à un certain niveau ou au-dessus si l'on veut obtenir un allumage fiable et, en conséquence, des émanations moins polluantes.

La teneur en soufre

On ne peut parvenir à rendre le soufre inoffensif en améliorant la combustion ou l'action catalytique. On doit l'éliminer à la source. On trouve du soufre dans les émanations de particules en provenance du moteur. D'autre part, la présence de soufre empêche le catalyseur de jouer son rôle d'épurateur vis-à-vis des autres émanations. L'emploi d'un catalyseur avec le carburant diesel normal peut favoriser l'augmentation des émissions de particules dues à l'oxydation catalytique des composés à base de soufre. Au bout d'un certain temps, le soufre empoisonne aussi le catalyseur et en réduit l'aptitude à convertir le CO et les HC. L'EPA a proposé des mesures législatives, adoptées l'été dernier, rendant obligatoire en 1994, aux États-Unis, l'emploi de carburants diesel à faible teneur en soufre par les véhicules routiers. Il est prévu qu'une loi similaire entrera en vigueur au Canada.

Pour le moment, on prévoit généralement que la teneur en soufre de 0,05 % et que l'indice 40 de cétane vont devenir des normes. En conséquence, les fabricants de moteurs prédisent tous leurs futures performances en se basant sur ces prévisions.

La teneur en hydrocarbures aromatiques

Les hydrocarbures aromatiques contenus dans le carburant diesel affectent l'indice de cétane (80), les émanations de CO et de HC et, dans une moindre mesure, les émanations d'oxydes d'azote (81). Les carburants diesel courants contiennent généralement de 25 à 35 % d'hydrocarbures aromatiques. La direction de la qualité de l'air de la Côte sud exige que les carburants diesel vendus dans la région de Los Angeles ne contiennent pas plus de 10 % d'hydrocarbures aromatiques. Certains souhaiteraient même que l'on étende cette exigence à l'ensemble des États-Unis. Les procédés de raffinage nécessaires à la réduction de la teneur en composés aromatiques à ce niveau exigent des pressions et des températures très élevées, donc la mise en oeuvre d'équipements très coûteux. L'EPA n'a pas encore décidé de réduire le contenu aromatique des carburants aux États-Unis. On peut se demander s'il serait justifié sur la base coût/avantage de réduire le contenu aromatique des carburants puisque l'exigence relative à un indice de cétane minimal a pour effet d'empêcher l'augmentation du contenu aromatique au-dessus des niveaux actuels.

L'indice de cétane

La valeur de l'indice de cétane des carburants diesel a diminué graduellement au Canada et aux États-Unis au cours des dix dernières années en raison de la diminution de la demande pour les huiles lourdes et de l'augmentation de la demande pour les carburants diesel, et en raison aussi d'un déclin général de la qualité des approvisionnements en pétrole brut. On s'accorde généralement pour dire que les moteurs modernes ne peuvent tolérer un indice de cétane inférieur à 40 sans effets notoires sur la combustion. On peut maintenir l'indice 40 sans trop de difficultés en modifiant en conséquence les processus de raffinage.

Les conséquences sur l'approvisionnement en carburant diesel

L'approvisionnement en carburant diesel ne souffrira pas si l'on se donne assez de temps pour réaménager les raffineries en fonction des nouvelles spécifications. Les procédés modernes de raffinage offrent beaucoup de flexibilité dans le traitement du pétrole brut. Toutefois, une brusque demande de carburant diesel à faible teneur aromatique provoquerait des difficultés car il serait impossible d'affecter à cette production un pourcentage important des stocks de distillat moyen. Selon les raffineries, la capacité de production de carburant diesel pourrait baisser de 10 à 25 %. La construction des installations nécessaires au redressement de capacité prendrait de trois à cinq ans et le coût en serait très élevé. Il s'avérera nécessaire d'augmenter la capacité de désulfuration pour fournir les quantités voulues de carburant à basse teneur en soufre. Il est probable que certaines petites raffineries devront fermer en raison de l'impossibilité où elles se trouveront de se procurer les capitaux nécessaires aux immobilisations voulues. L'industrie pétrolière s'inquiète beaucoup de la réduction éventuelle du contenu aromatique des carburants. On peut utiliser les installations d'hydrotraitement à haute pression nécessaires à la production des carburants diesel à faible teneur aromatique pour produire des carburants à faible teneur en soufre. Mais l'inverse n'est pas vrai. On se trouverait dans une situation particulièrement perturbante et génératrice de gaspillage si une loi portant sur la réduction du contenu aromatique des carburants était adoptée après la construction à grands frais par les raffineurs de nouvelles installations de désulfuration qui se trouveraient immédiatement désuètes.

V L'IMPACT DE LA SUBSTITUTION DU CARBURANT

A. VUE D'ENSEMBLE

Plusieurs technologies ont été proposées pour satisfaire les normes relatives aux émanations. Ces technologies incluent notamment les moteurs diesel à pièges à particules, et les carburants de rechange tels que le méthanol et le gaz naturel. Les fabricants ont récemment mis l'accent sur la production d'un moteur acceptable sur le plan des émanations, durable par rapport à l'actuelle technologie des moteurs diesel (durabilité mesurée sous forme de distance médiane entre les défaillances) et comparable aux moteurs diesel actuels sur le plan du coût d'exploitation (à l'exception du coût du carburant).

Pour étudier l'impact net de ces diverses technologies, nous avons élaboré un modèle qui devrait permettre de comparer les émanations sur route en termes de débit par distance parcourue (g/km). Le modèle en question s'applique à un parc d'autobus de transport urbain de remplacement dans une ville canadienne. Le parc dispose de quatre options de remplacenment du moteur :

- remplacement par un moteur diesel moderne (c'est-à-dire sans changement fondamental);
- remplacement par un moteur diesel moderne avec piège à particules;
- remplacement par un moteur au méthanol;
- remplacement par un moteur au gaz naturel.

Notre description du modèle et les commentaires qui suivent ont trait à l'impact net de chacune des options proposées sur les émanations. Nous allons aussi faire ressortir et résumer certains des problèmes logistiques et opérationnels liés aux différentes options. Dans notre analyse, nous n'abordons pas la question controversée portant sur le moment où les diverses technologies seront commercialement disponibles. Il s'agit plutôt d'un simple examen fondé sur les données actuellement disponibles et sur un certain nombre de suppositions. Nous avons fait porter notre étude sur les autobus de transport en milieu urbain en raison des règlements qui entreront bientôt en vigueur aux États-Unis et parce que ces véhicules fonctionnent dans un environnement bien défini. Compte tenu de ces données, il est vraisemblable que ce sont les autobus urbains qui seront les plus aptes à être offerts avec des moteurs à carburant de rechange.

Le tableau V-1 énumère les divers moteurs faisant l'objet de cette analyse. Nous avons choisi des moteurs spécifiques de façon à établir un profil des émanations et à comparer différentes technologies. Plusieurs critères nous ont guidé dans la sélection des moteurs, notamment :

- le moteur doit actuellement être envisagé ou avoir déjà été envisagé comme moteur d'autobus urbain;
- les données concernant les émanations et la consommation de carburant du moteur de base font partie du domaine public;
- le moteur est du type à grand rendement

Tableau V-1. Moteurs éventuels pour autobus de transport en commun

Genre de carburant	Moteur	Remarques
Diesel	DDC 6V71N	Moteur de base pour autobus canadien
	DDC 6V92TA	Moteur canadien approuvé quant aux émanations (déc. 1988) pour remplacer le modèle 6V71N
	DDC 6V92TA	Avec piège à particules
Méthanol	DDC 6V92TA	Moteur de production envisagé
Gaz naturel	Cummins L10	Technologie de la génération 1, par ex. pour transp. en commun à Toronto

Les suppositions portent sur les domaines suivants :

Moteurs Diesels : le moteur principal équipant les autobus de transport urbain au Canada est le modèle 6V71N de DDC. Depuis l'entrée en vigueur des nouvelles normes canadiennes sur les émanations, le 1er décembre 1988, le moteur de remplacement de DDC est le modèle 6V92TA.

Piège à particules : nous supposons qu'un piège à particules viable est commercialement disponible pour le moteur 6V92TA. De plus, le moyen de piégeage des particules devrait être traité à l'aide d'un catalyseur de façon à abaisser également les émanations gazeuses. En outre, la durabilité du piège doit correspondre à une distance parcourue d'au moins 464 700 km (290 000 milles), c'est-à-dire à la norme des États-Unis relative à l'homologation. Le moteur 6V92TA de DDC serait muni de pièges et alimenté par un carburant à faible teneur en soufre.

Moteurs au méthanol : nous avons établi le profil du moteur "de série" équipé d'un catalyseur. Il s'agit du moteur au méthanol que DDC a l'intention de commercialiser en 1991. Cette version de moteur offre les plus faibles émanations possibles parmi les moteurs au méthanol. La société DDC est le principal fabricant de moteurs d'autobus urbains en Amérique du Nord. Les moteurs DDC au méthanol ont subi des essais en pratique à l'occasion de divers programmes de démonstration dans l'ensemble de l'Amérique du Nord. La version "de série" proposée est la plus récente version du moteur au méthanol de DDC. Cette version offre certains raffinements, par exemple le ralenti sur 3 cylindres, un taux de compression accru, un turbocompresseur amélioré, un nouveau profil de came d'échappement et un catalyseur destiné à réduire encore plus les émanations des gaz d'échappement que ne l'exigent les règlements et, enfin, une consommation de carburant plus économique. Éventuellement, DDC offrira deux configurations avec catalyseurs : d'un côté une configuration comportant un catalyseur optimisé à l'égard de la réduction des CO et, de l'autre, un catalyseur optimisé à l'égard de la réduction des hydrocarbures. De cette façon, les acheteurs pourront optimiser la configuration de leurs moteurs en fonction de leur environnement. Nous supposons que le moteur au méthanol présenté dans cette analyse est commercialisé.

Moteur au gaz naturel : il s'agit d'une version au gaz naturel du moteur L 10 de Cummins. Nous avons sélectionné le modèle L 10 en raison des efforts déployés par Cummins au cours des dernières années pour mettre au point une version du L 10 au gaz naturel et aussi parce que cette société a fait des progrès notoires sur le marché nord-américain des autobus de transport. Le moteur L 10 au gaz naturel qui fait l'objet de notre analyse représente la technologie de la "génération I". Cette appellation est due au fait que ce moteur appartient à la première génération des moteurs qui ont été modifiés pour fonctionner au gaz naturel conprimé. Les modifications apportées comprennent un mélangeur de gaz de type Impco et un système d'allumage par étincelle similaire à celui que l'on trouvait sur les moteurs Iveco qui équipaient autrefois les tramways de la ville d'Hamilton. Les moteurs L 10 de Cummins au gaz naturel sont utilisés par la Commission des transports en commun de Toronto et par les services de tramways d'Hamilton. Un système d'alimentation au gaz naturel plus perfectionné est déjà en cours de développement. Ce nouveau système, qui appartiendra à la "génération II", sera doté de commandes électroniques et d'un dispositif d'injection directe du gaz. Il en est encore au stade des études et n'a pas encore subi d'essais pratiques. Nous supposons que ce moteur est équipé d'un catalyseur et qu'il est commercialisé. Tout comme DDC, Cummins a

annoncé son intention de mettre en marché un moteur L 10 alimenté au gaz naturel à partir de 1991.

B. LES ÉMANATIONS RÉGLEMENTÉES

Les données sur les émanations résultant des essais dynamométriques des moteurs ont été rassemblées à partir de publications. Pour prédire l'impact des émanations sur chaque moteur sur une base de poids par distance parcourue (g/km), nous avons utilisé le facteur de pollution (FP) de l'EPA (37). Voici comment calculer le facteur de pollution :

EP =	Densité du carburant / CDSC* CCF	(kW/h) / (Km)
où :	CSC = Consommation spécifique de carburant	(g/kW/h)
	CCV = Consommation de carburant du véhicule	(Km/l)
	Densité du carburant	(g/l)

On peut alors prédire les émanations sur route comme suit :

Émanations = FP * (émanations d'après les essais du moteur au dynamomètre)

Un facteur de pollution prend la consommation routière en considération et permet donc d'attribuer aux données d'essais dynamométriques du moteur des valeurs qui tiennent compte des habitudes de conduite qui prévalent dans un parc donné. Comme on ne dispose pas de données sur les émanations résultant d'essais dynamométriques sur châssis pour tous les scénarios possibles, l'emploi du FP permet de traiter toutes les options sur un pied d'égalité. Les valeurs attribuées aux émanations sont présentées sur une base de poids par distance parcourue de façon à égaliser les différences de puissance nominale entre les divers moteurs (par ex., 6V71N à 140 kW et 6V92TA à 207 kW) et à présenter les données sous une forme reconnaissable et facile à comprendre. Bien que les résultats présentés ne constituent pas une indication absolue à l'égard des émanations, ils font cependant ressortir les différences relatives entre les moteurs. L'une des faiblesses de ce genre de comparaison est l'effet produit par le changement de puissance nominale d'un moteur donné. Cela se répercute en effet sur les charges du cycle d'essai à régimes transitoires et, en conséquence, sur l'ensemble des émanations spécifiques en fonction de la

puissance au frein et sur la consommation routière. Dans le cadre de cette analyse, nous supposons que le parc acceptera un type de moteur donné, même si, en réalité, la tendance au Canada en matière de moteurs d'autobus de transport en commun soit à l'augmentation de la puissance, c'est-à-dire à une puissance nominale supérieure aux 150 kW du moteur 6V71N.

Les données publiées par l'Association canadienne des transports urbains fournissent les chiffres de la consommation routière de carburant de la plupart des parcs canadiens. La plupart du temps, ces données proviennent de parcs équipés de moteurs 6V71N. Comme on le voit au tableau V-2, la consommation de carburant varie considérablement d'une ville à l'autre. Aux fins de la présente analyse, nous avons choisi une ville de base de façon à proportionner les données sur la consommation routière en fonction des divers carburants et obtenir ainsi une consommation moyenne pour l'ensemble du parc. Dans l'exemple qui suit, c'est la ville de Vancouver qui a été choisie pour le moteur diesel de base (le moteur 6V71N). Nous avons ensuite prédit la consommation routière de carburant des moteurs 6V92TA au méthanol et au carburant diesel à Vancouver en comparant la différence en pourcentage de CSC de méthanol et de carburant diesel de ces moteurs avec la CSC du 6V71A. La différence en pourcentage a servi à proportionner les données de consommation routière du moteur 6V71NA. Nous avons prédit les résultats relatifs à la consommation des véhicules propulsés au gaz naturel en ajustant les chiffres de la consommation en carburant du moteur L10 fournis par les services de transport en commun de Toronto de façon à tenir compte de la différence de pourcentage entre les chiffres de la consommation de carburant diesel de Vancouver et de Toronto. Le tableau V-3 est une récapitulation des données utilisées sur la consommation en carburant des véhicules. Nous avons imposé une pénalité de 6 % au moteur équipé d'un piège à particules.

Dans les calculs sur les émanations, nous n'avons tenu compte que des émanations des gaz d'échappement du moteur. Nous n'avons pas tenu compte des émanations provenant du carter ou des émanations évaporatives d'hydrocarbures. Les données relatives aux HC des gaz d'échappement du moteur représentent le total des HC. Les parties intéressées ont beaucoup discuté de la meilleure manière de présenter les données relatives aux émanations de HC, surtout dans le cas des moteurs à carburant de rechange. La discussion a porté principalement sur la manière de rendre compte avec exactitude de la réactivité ou de l'impact net des composants des émanations.

Comme on l'a vu au chapitre III, l'EPA a pris l'initiative en ce qui concerne les moteurs au méthanol. C'est le méthane qui est le composant principal des émanations de HC provenant des moteurs au gaz naturel. Bien qu'il soit photochimiquement inerte, le méthane est un gaz de serre.

Tableau V-2. Consommation des autobus canadiens de transport en commun (1986)

Ville	Litres/Km
Vancouver	50,99
Edmonton	55,95
Hamilton	59,32
Toronto	54,72
Montréal	63,44
Moyenne	56,88

N.B. Les chiffres représentent la consommation totale de carburant diesel divisée par la totalité des kilomètres parcourus par l'ensemble des véhicules du parc.

Tableau V-3. Consommation de carburant prévue par type de moteur (Vancouver)

Moteur	Consommation de carburant
DDC 6V71N diesel	51.0,L/100 km
6V92TA	47,8
6V92TA av. piège à particules	50,9
6V92TA méthanol	107,5
Gaz naturel	66,8 m³/100 km

Nous avons supposé que le piège à particules était efficace à 80 % dans la réduction des émissions de particules. Les développements récents en matière de conception de pièges à particules montrent aussi qu'ils peuvent servir à réduire les émanations de gaz d'échappement faisant l'objet de règlements. Nous prenons pour hypothèse que les émanations gazeuses de HC, de CO et d'oxydes d'azote ont été réduites respectivement de 40 %, 70 % et 25 % (73). La pénalité appliquée à la consommation nette de carburant était de 6 % (45, 46, 47). Aucune évaluation n'a été faite pour tenir compte des émanations accompagnant la régénération du piège.

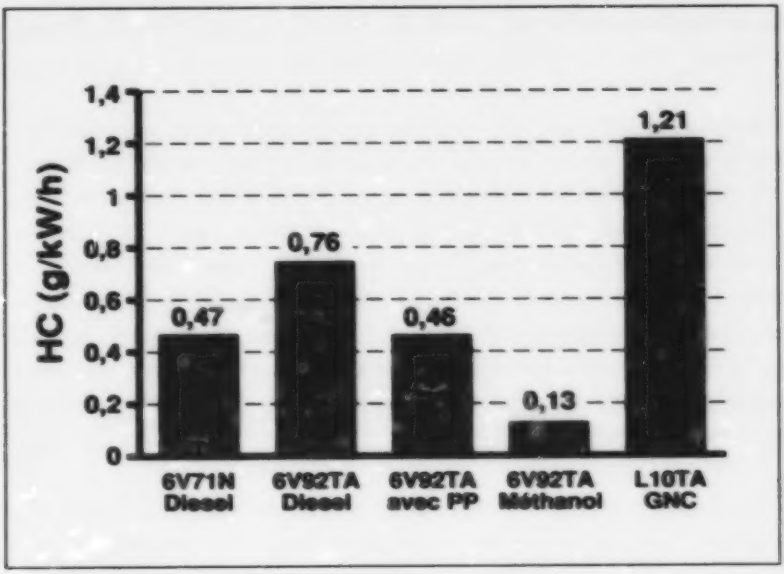
Nous avons prédit les émanations routières à l'aide des facteurs de pollution et des profils d'émanations. Les résultats des essais du moteur au dynamomètre, et les prédictions relatives aux profils des émanations sont présentés dans les graphiques V-4 à V-7 et V-8 à V-11 respectivement.

L'adoption de carburants de rechange, l'installation de pièges à particules et l'emploi de carburants à faible teneur en soufre peuvent engendrer une réduction importante des émanations de base soumises aux règlements. Dans l'exemple présenté dans cette section, les trois moteurs, c'est-à-dire le moteur au méthanol "de série", le moteur au gaz naturel et le moteur diesel équipé d'un piège à particules seront conformes aux normes américaines de 1991 relatives aux émanations (graphiques V-4 à V-7). L'ajout d'un piège à particules à un moteur diesel et son alimentation par un carburant à faible teneur en soufre donnent des profils d'émanations comparables à ceux des moteurs à carburant de rechange (graphiques V-4 à V-11).

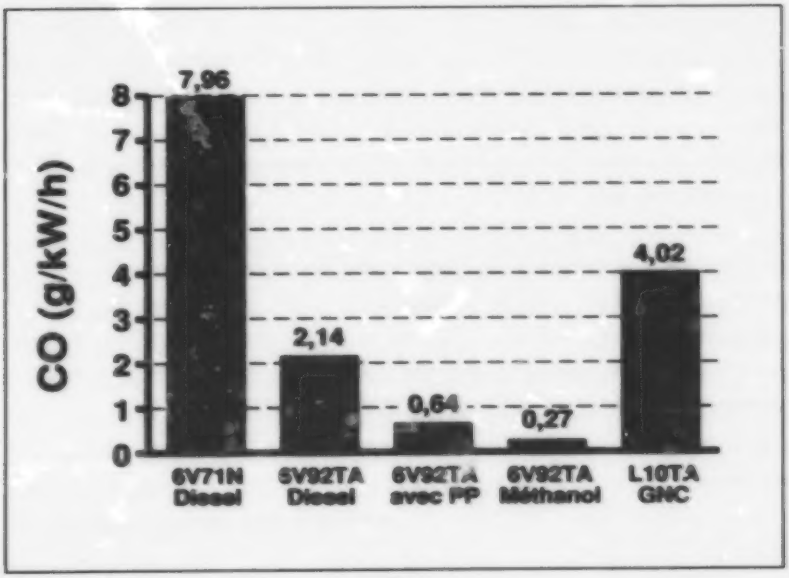
Dans l'exemple présenté, c'est le moteur au méthanol qui, dans l'ensemble, engendre le moins d'émanations. La plus grande partie de cet avantage est due à l'utilisation d'un convertisseur catalytique. Les résultats exposés dans les graphiques V-4 à V-11 montrent qu'il est possible de réduire les émanations en ayant recours à un carburant de rechange ou en dotant le moteur d'un piège à particules. Si l'on veut faire accepter les moteurs à carburant de rechange, il faut prouver que ces moteur permettent d'abaisser l'ensemble des émanations et non se contenter de compenser la réduction d'un type d'émanation par l'augmentation d'un autre. De plus, les fabricants de moteurs devront solidifier les gains obtenus par les moteurs à carburant de rechange sur le plan de la réduction des émanations en assurant leur durabilité à long terme et en veillant à les rendre économiques en matière de coût d'exploitation répartis sur la vie de l'ensemble moteur/véhicule.

Pressés par l'imminence de l'imposition de règlements sévères sur les émanations aux États-Unis, les fabricants cherchent à développer des moteurs convenant à l'homologation. Au moment où nous rédigeons ce rapport, seule la société DDC avait annoncé publiquement son intention de mettre sur le marché un moteur au méthanol pour l'année de fabrication 1991.

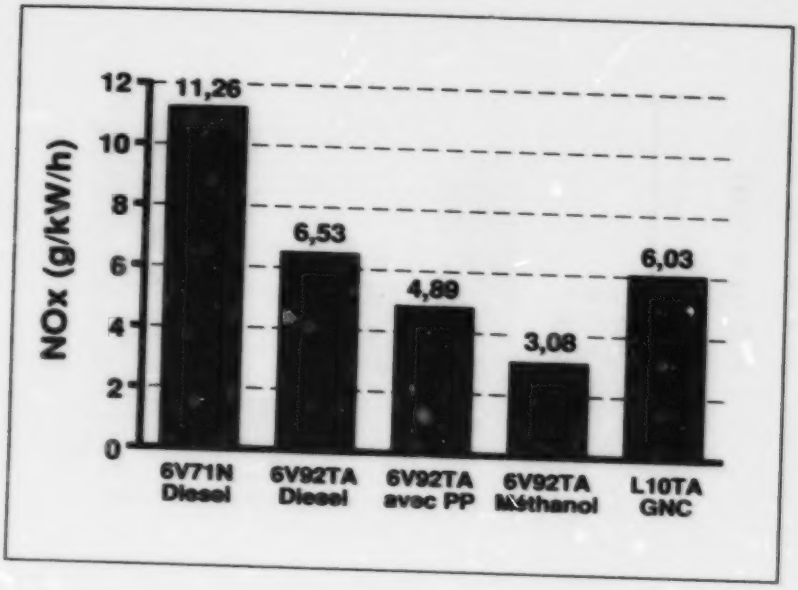
Graphique V-4. Comparaison entre les émanations d'hydrocarbures (HC)



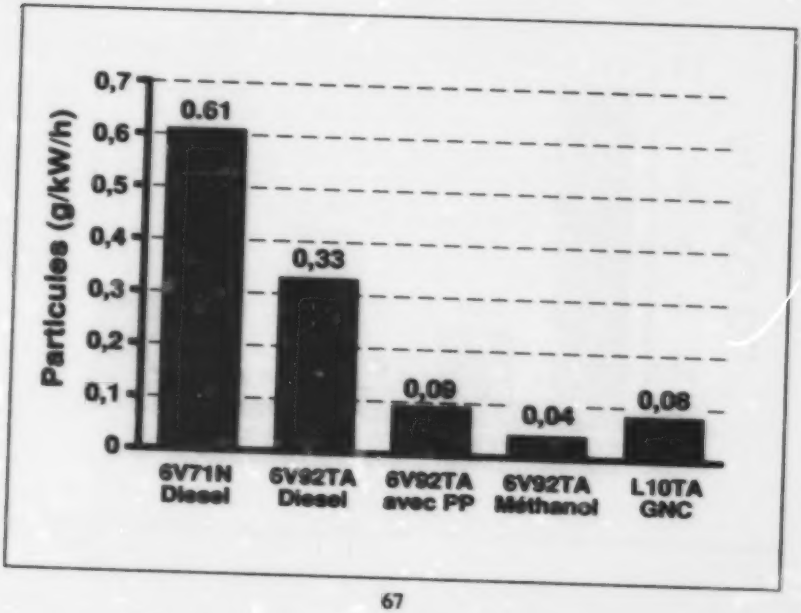
Graphique V-5. Comparaison entre les émanations d'oxyde de carbone (CO)



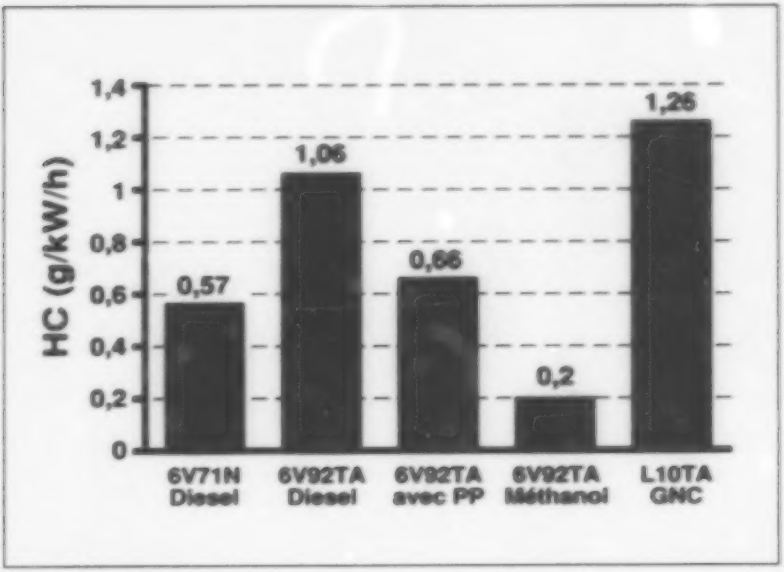
Graphique V-6. Comparaison entre les émanations d'oxydes d'azote



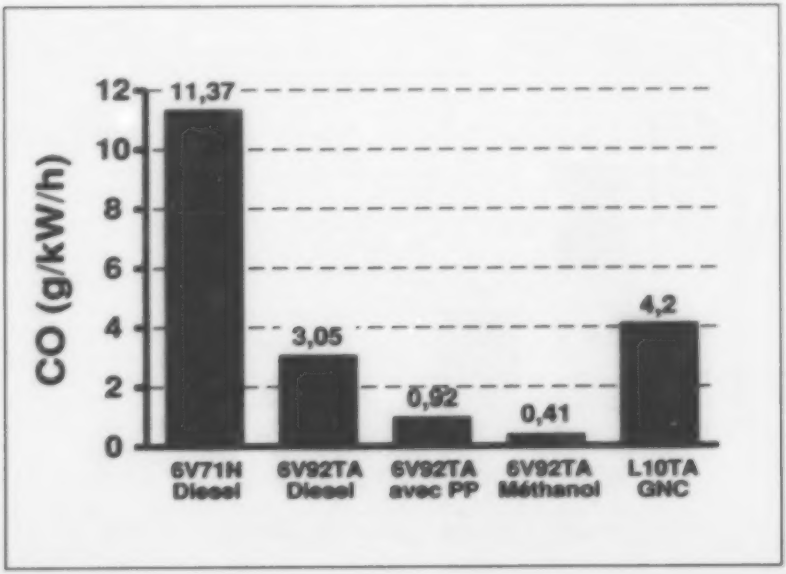
Graphique V-7. Comparaison entre les dégagements de particules



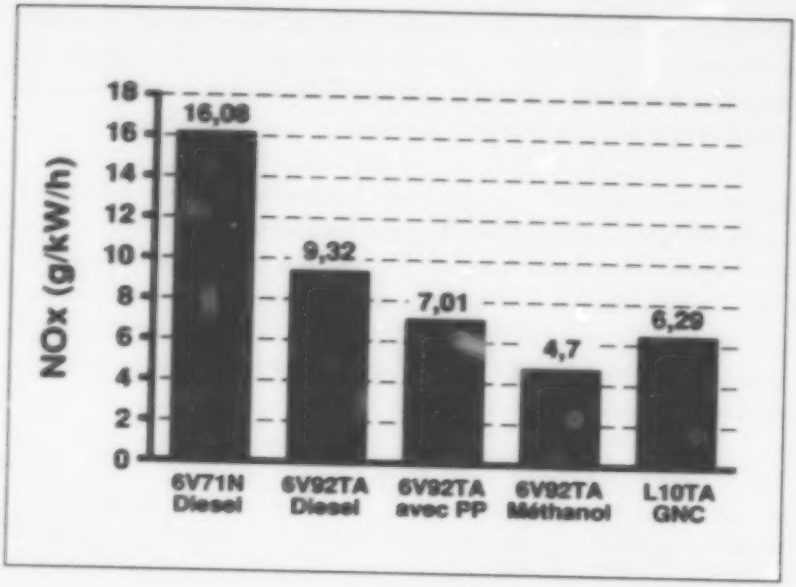
Graphique V-8. Prévisions d'émanations d'hydrocarbures (HC)



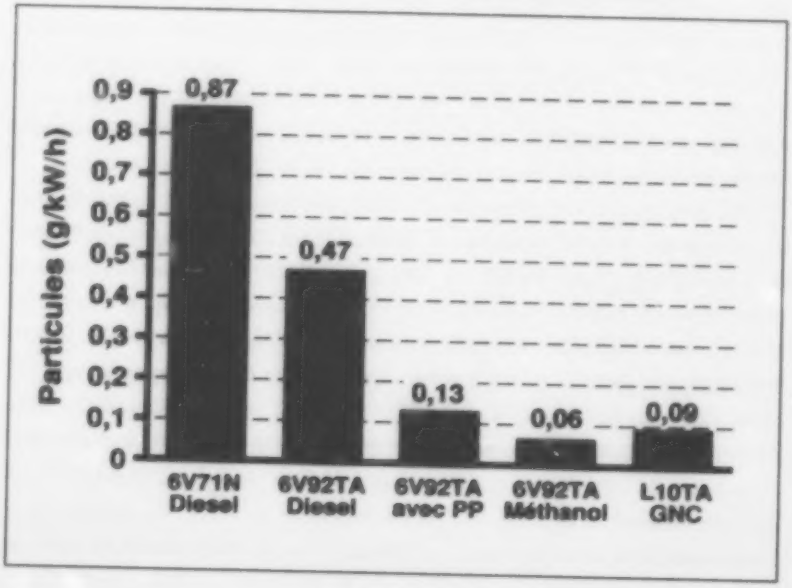
Graphique V-9. Prévisions d'émanations d'oxyde de carbone (CO)



Graphique V-10. Prévisions d'émanations d'oxydes d'azote



Graphique V-11. Prévisions de dégagements de particules



C. PRODUCTION DU GAZ CARBONIQUE

Au cours des dernières années, les médias ont exprimé beaucoup d'inquiétude concernant le gaz carbonique et ses effets sur le réchauffement global. Le gaz carbonique vient au quatrième rang parmi les gaz les plus courants de l'atmosphère.

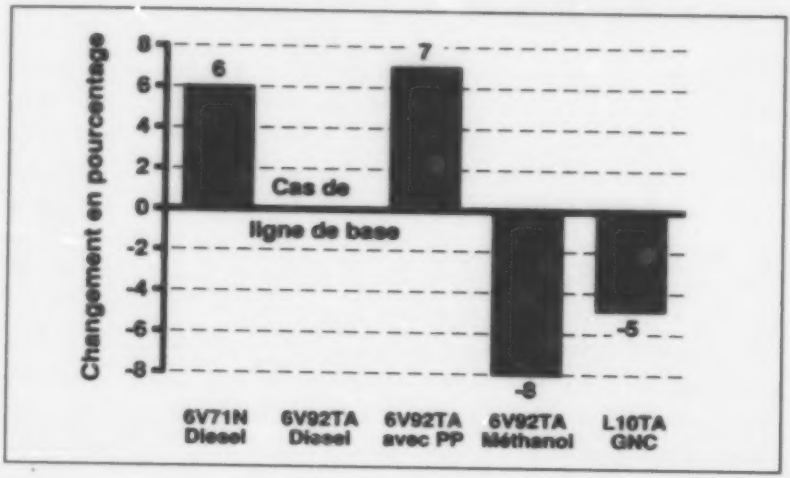
Les sources principales de CO_2 ne sont pas de nature anthropogénique. La proportion d'émanations de CO_2 d'origine humaine s'élève à environ 2 % en terme global (52). Contrairement aux polluants déjà mentionnés, qui tendent à présenter des problèmes sur les plans local ou régional, tout changement dans les concentrations ambiantes de CO_2 a des conséquences globales. L'augmentation du taux de CO_2 dans l'atmosphère aura des effets perturbateurs sur l'ensemble de la biosphère.

Les émanations de CO_2 à caractère anthropogénique résultent de la combustion de substances contenant du carbone. Les émanations de gaz carbonique produites par les véhicules ne font pas l'objet de règlements. On pourrait parvenir à réglementer les niveaux de CO_2 en fixant des limites maximales à la consommation de carburant. Cela a déjà été fait en ce qui concerne les véhicules légers. Généralement parlant, le marché se réglemente de lui-même, surtout dans le cas des moteurs de véhicules lourds, étant donné que leurs propriétaires sont soucieux de limiter leurs frais d'exploitation. En effet, toute réduction de la consommation de carburant se traduit par une réduction des frais d'exploitation.

Les émanations de CO_2 sont proportionnelles à la teneur en carbone du carburant. On a comparé les émanations de CO_2 prélevées aux tuyaux d'échappement des cinq moteurs dont il a été question précédemment avec ceux du moteur diesel 6V92TA de base. Les émanations relatives de CO_2 présentée dans le graphique V-12 ont été calculées en se basant sur un équilibre simplifié des composants contenant du carbone, c'est-à-dire le carburant, qu'il s'agisse de $C_{11}H_{19}$ (diesel) (53), de CH_3OH (méthanol) ou de CH_4 (gaz naturel), moins les hydrocarbures produits (par hypothèse, le carburant), l'oxyde de carbone (CO) et les particules de carbone. Les résultats montrent que les émanations de CO_2 sont proportionnelles à la consommation et à la teneur en carbone du carburant. Dans le cas du carburant diesel, le moteur doté d'un piège à particules présente une augmentation de 7 % de la concentration de CO_2, ce qui est dû à l'augmentation de consommation de carburant. La plus faible teneur en carbone

du méthanol et du gaz naturel (un atome de carbone par molécule de carburant) prouve qu'il est possible de réduire le débit de gaz carbonique. Même sans avoir recours à notre simplification, on observe que le CO et les particules sont des constituants contenant du carbone plutôt mineurs des gaz d'échappement. Le débit total de CO_2 dépend donc de la consommation de carburant et du taux de conversion du carbone à une autre substance contenant du carbone.

Graphique V-12. Changements prévus concernant les émanations de gaz carbonique (CO_2) en provenance des moteurs



Quoique ce soit les émanations de CO_2 que l'on ait associé à l'effet de serre, il serait prudent d'effectuer une étude complète sur la production de gaz de serre par chacun des carburants envisagés. L'étude en question viserait à établir la liste de tous les gaz de serre importants produits, à partir de l'extraction et du traitement du carburant jusqu'à sa distribution et, éventuellement, à sa combustion dans un moteur. Parmi les gaz de serre importants dont il faut tenir compte en plus du CO_2 on trouve le méthane (CH_4), les chlorofluorocarbures (CFC) et l'oxyde azoté (N_2O). Bien que le CO_2 soit le gaz prédominant parmi les gaz d'échappement d'un véhicule, on estime que l'effet de serre produit par CH_4, CFC_{12} et N_2O sur une base moléculaire, comparé à celui de CO_2, va de 5,8 à 42,3, de 10 000 à 44 449 et de 286 à 449 fois respectivement (53).

D. AUTRES CONSIDÉRATIONS

Les résultats proposés dans ce chapitre présentent les avantages potentiels que l'on peut tirer d'un carburant de rechange du point de vue des émanations. Avant de prendre une décision finale quant au type de moteur qu'un parc devrait adopter (que ce soit au sujet des pièges à particules, ou de la propulsion au méthanol ou au gaz naturel), il est nécessaire d'examiner à fond la question des frais d'exploitation relatifs à l'un ou l'autre des carburants de rechange. Parmi les questions à étudier, mentionnons l'infrastructure du parc, le rayon d'action et la charge utile des véhicules.

L'une des dépenses importantes à réaliser, quelque soit le carburant de rechange choisi, portera sur la modification ou la construction des installations du parc. Cela comprend les pompes à carburant et, en raison des impératifs touchant la sécurité à l'égard du méthanol et du gaz naturel par comparaison au carburant diesel, le matériel de lutte contre l'incendie et l'appareillage électrique convenant aux zones présentant des dangers d'explosion et d'inflammabilité. Selon une étude effectuée récemment pour un service américain de transport en commun, le coût total du réaménagement de ses installations a été évalué à 2,5 millions de dollars pour la substitution au méthanol et à 4,65 millions de dollars pour le gaz naturel (54). Ces devis s'appliquaient à un garage spécifique desservant 150 autobus. Les coûts seront subordonnés au choix de l'emplacement et subiront l'influence des règlements municipaux, régionaux (province/État) et fédéraux.

Les frais d'exploitation d'un parc dépendront du rayon d'action et de la charge utile des véhicules. Étant un carburant liquide, le méthanol est facilement manipulable à l'aide des moyens classiques de manipulation des carburants. Il faudra doubler le volume du réservoir à carburant du véhicule pour l'adapter à son rayon d'action par rapport au carburant diesel. Il faudra aussi se préoccuper de la compatibilité entre les matériels. Le gaz naturel nécessite des réservoirs d'entreposage sous pression, ce qui peut limiter l'espace disponible pour le fret et pénaliser sévèrement le véhicule en matière de poids. Ce problème d'alourdissement du véhicule a été negligé dans les publications favorables au gaz naturel. Si l'on veut exploiter le véhicule sans dépasser les charges par essieu maximales permises, on ne pourra surmonter les problèmes d'alourdissement liés aux carburants de rechange, en particulier au gaz naturel, qu'en augmentant le nombre de véhicules (ou en construisant des autobus dotés d'un essieu additionnel), ce qui entraîne des mises de fonds supplémentaires.

VI CONCLUSIONS

1. Il y a beaucoup de différences dans les moyens utilisés pour réglementer les émanations de gaz d'échappement des moteurs et des véhicules. Comme la réglementation constitue pour un pays ou une région un moyen d'exercer sa souveraineté, il est peu probable que l'on adopte bientôt un règlement uniforme.

2. On mesure les émanations des gaz d'échappement soit à des fins de réglementation soit pour acquérir des connaissances scientifiques. Néanmoins, les essais relatifs aux émanations visent principalement à s'assurer que celles-ci ne dépassent pas les concentrations permises par les règlements, ce qui limite les possibilités d'échanges scientifiques libres des données sur les émanations.

3. L'adoption d'un essai commun touchant les émanations des gaz d'échappement permettrait d'accélérer l'échange scientifique de données et peut-être de commercialiser plus rapidement les moteurs dotés des améliorations techniques axées sur la réduction des émanations.

4. Du point de vue des émanations des gaz d'échappement, les moteurs de véhicules lourds alimentés au méthanol offrent des promesses aux fabricants désireux d'offrir des moteurs conformes aux futures normes sur les émanations (normes américaines de 1991 et de 1994).

5. Seuls le gouvernement fédéral des États-Unis et l'État de Californie se sont préoccupés des moteurs alimentés au méthanol dans le cadre de leurs réglementations.

6. L'absence de normes sur les émanations engendrées par un carburant de rechange cause une certaine confusion. Les fabricants hésiteront à investir considérablement dans le développement d'un moteur tant qu'ils ne connaîtront pas les règles du jeu.

7. Les prototypes des moteurs diesel perfectionnés peuvent satisfaire les normes sur les émanations de 1994. Les fabricants sont optimistes quant aux possibilités de produire ces moteurs en série en 1994.

8. On peut utiliser des pièges à particules pour réduire les émissions de particules d'environ 80 % sur n'importe quel moteur diesel et y ajouter un dispositif de traitement catalytique pour réduire les émanations de CO et de HC.

9. Les fabricants devront conférer à leurs moteurs une durabilité à long terme comparable à celle dont bénéficient les moteurs diesel s'il veulent que les moteurs à carburant de rechange ou que les moteurs diesel perfectionnés connaissent un succès commercial.

10. On peut parvenir à réduire les émanations de gaz carbonique en diminuant la consommation de carburant ou en changeant de carburant.

11. Le méthanol et le gaz naturel permettent de réduire les émanations de gaz carbonique par comparaison au carburant diesel.

12. Lorsqu'on évalue l'impact environnemental net des divers carburants de rechange, il est nécessaire de procéder à une étude approfondie de toutes les questions relatives à l'énergie et aux émanations. L'étude en question devrait faire ressortir l'impact net résultant de l'emploi d'un carburant de rechange, y compris certains facteurs tels que l'extraction, le traitement, la distribution et la combustion du carburant.

VII BIBLIOGRAPHIE

(1) Walsh, M.P. *Global Trends in Motor Vehicle Air Pollution Control*, SAE 850383.

(2) Barnes, G.J. Donohue, R.J. (Environmental Activities, GMC); *A Manufacturer's View of World Emissions Regulations and the Need for Harmonization of Procedures*, SAE 85039.

(3) Communication présentée par N. Ostouchov, Environnement Canada (janvier 1988).

(4) Communication présentée par Y. Tsuruno, Directeur, Division de la politique énergétique, Ministère des Transports, Japon, le 6 avril 1988.

(5) Communication présentée par P. Garibaldi, Ecofuel, Milan, Italie, le 2 mai 1988.

(6) Environmental Protection Agency, Titre 40-*Protection of the Environment*, Chapitre I, Subpart J, p. 1000.

(7) Direction des programmes industriels, Direction générale de la protection de l'environnement; Environnement Canada; *Air Pollution Emissions and Controls, Heavy Duty Vehicles*, septembre 1986.

(8) United States Environmental Protection Agency; *Mobile Source Emissions Standards Summary*, date de la révision : le 15 mars 1987.

(9) Seiffert, U. (Volkwagenwerk, A.G.); *Status of German/European Exhaust Emissions Legislation*, SAE 851211.

(10) Federal Register, Part II, Environmental Protection Agency; *Standards for Emissions from Methanol Fueled Motor Vehicles and Motor Vehicle Engines*, 40 CFR Part 86, le 11 avril 1989.

(11) Submission by the State of California Air Resources Board, in response to docket No. A-84-05 (EPA's Notice of Proposed Rule Making - le 29 août 1986) le 26 novembre 1986.

(12) Neitz, A., (MAN); *MAN Methanol Engines for Use in Buses* (en date du 26 janvier 1987).

(13) Nietz A., and Chmela F; *The MAN Methanol Engine Powering City Buses*, 5e Symposium international sur les carburants alcoolisés, Auckland, 1982.

(14) Nietz, A., and Chmela, F.; *Results of Further Development in the MAN Methanol Engine*, Maschinen Fabrik-Augsberg-Nurnberg A.G. VI Symposium international sur les carburants alcoolisés. Ottawa, 1984.

(15) Jackson, M.D., Unnasch, S., Sullivan, C., and Renner, R.A.; *Transit Bus Operation with Methanol Fuel*, Acurex Corp. and California Energy Commission.

(16) Krenelka, T.C., Turanski, A.J., and Murphy, M.J.; *Methanol Bus Program Data Analysis Report*, U.S. Urban Mass Transit Administration, Rapport préparé par Battelle, Division Columbus.

(17) Francis, G.A., and King R.D.; *Providing Ground Comparison of MAN Methanol and Diesel Transit Buses*, U.S. Urban Mass Transit Administration, Rapport préparé par Battelle, Division Columbus.

(18) Havenith, C.; *Experience with the Deutz Glow Plug Assisted Methanol Engine for Transit Bus Operation*, Kloeckner-Humboldt-Deutz AG, Cologne.

(19) Vergeer, H.C., Lawson, A., Burnett, T.C., and Sauerteig J.E.; *Assessment of a Heavy Duty Methanol Engine for Underground Mining*, SAE Paper 870812.

(20) Havenith, C., Hilger, U., and Kuepper, H.; *Performance and Emissions Characteristics of the Deutz Glow Plug Assisted Heavy-Duty Methanol Engine*, SAE Paper 872245.

(21) Hikino, K., and Suzuki, T.; *Improvement of Heavy Duty Spark-Assisted Methanol Engine for City Bus*, Hino Motors Limited, Tokyo.

(22) Bertilsson, B.M., and Gustavsson, L.; *Experience of Heavy-Duty Alcohol-Fuelled Diesel-Ignition Engines*, Volvo Truck Corporation, SAE Paper 871672.

(23) Bertilsson, B.M.; *Emissions Tests on a TD 100 Engine Fuelled with Methanol*, Svenska Metanolutveckling AB, Stockholm.

(24) Larsson, E.A.; *Further Field Testing of Hydrous Ethanol as Fuel for Heavy Duty in Sweden - The E95 Project*, Swedish Foundation for Ethanol Development, Ornskoldsvik.

(25) Baranescu, R., Hilger, V. et al., *Conversion of a Navistar DT-466 Diesel Engine to Methanol Operation*, Navistar International Inc., 1988.

(26) Shiino, S., and Nakashima, N.; *Development of a Spark-Assisted Heavy-Duty Methanol Engine*, Mitsubishi Motors Corporation, Tokyo.

(27) Takada, Y., Sasaki, M., and Machida, M.; *Durability of Heavy-Duty Direct Injection Methanol Engine*, Nissan Diesel Motor Company Limited, Saitama.

(28) Ishizuki, Y.; *Development of Komatsu Small Bore Methanol Engine*, Komatsu Limited, Tochigi, Japan.

(29) *Preliminary Driving Test Report on Methanol-Powered Vehicles*, Japan Automobile Transportation Technical Association, août 1986.

(30) Nylund, N.O., and Eklund, T.H.; *Experiences from an Ethanol-Fuelled Otta-Cycle Truck Engine*, Technical Research Centre of Finland.

(31) Jaye, J., Miller, S., and Bennethum, J.; *Development of the Detroit Diesel Corporation Methanol Engine*, Detroit Diesel Corporation.

(32) McCabe, R.W., Mitchell, P.J., Lipari, F., Scruggs, W.F., and Warburton, R.C.; *Catalyst Evaluation on a Detroit Diesel Allison 6V-92TA Methanol-Fuelled Engine*, General Motors Research, Detroit Diesel Allison Division of General Motors, SAE Paper 872138.

(33) Goldberger, L., and Simon M.; *Emissions Characterization of the Detroit Diesel Methanol Bus Engine*, City of New York Department of Environmental Protection.

(34) Fujita, O., Ito, K., and Sakomoto, Y.; *Catalytic Oxidation of Unburned Methanol from Methanol-Fueled Engines under Unsteady Operating Conditions*, Hokkaido University, Sapporo, Japon.

(35) Ito, K., and Fujita, O.; *Effects of NO on Catalytic Oxidation of Methanol*, Transactions: Japan Society of Mechanical Engineers, 1985, Vol. 51, No. 463.

(36) Communication with sources at Caterpillar Inc., avril 1988.

(37) Barsic, N.J., (John Deere Product Engineering Center); *Variability of Heavy-Duty Diesel-Engine Emissions for Transient and 13-Mode Steady State Test Methods*, SAE 840346.

(38) Lipari, F. (Environmental Sciences Dept., General Motors Research Laboratories), Keski-Hgnnila, D. (Detroit Diesel Allison Div.); *Aldehyde and Unburned Fuel Emissions from Methanol-Fuelled Heavy-Duty Diesel Engines*, SAE 860307.

(39) Manicom, B. (ORTECH International); *Testing of a Second Cummins L10 Methanol Engine for the MILE Program - For Sypher:Mueller International Inc.*, N° du rapport 5880, AET-89-11, le 28 février 1989.

(40) Caterpillar Inc.; *Project MILE Monthly Progress Report*, Rapport préparé à l'intention de Sypher:Mueller International Inc., août 1986.

(41) Caterpillar Inc.; *Project MILE Monthly Progress Report*, Rapport préparé à l'intention de Sypher:Mueller International Inc., novembre 1987.

(42) Ullman, T.L., and Hare, C.T. (Southwest Research Institute); *Emission Characterization of an Alcohol/Diesel-Pilot Fueled Compression Ignition Engine and Its Heavy Duty Diesel Counterpart*, préparé pour EPA, É.-U., août 1981, N° du rapport EPA-460/3-81-023.

(43) Data Extrapolated from DDC Plot Entitled; *DDC Methanol Engine, Transient Emissions*, printemps 1988

(44) James, B.A. (EMR Canada); *Demonstration of Natural Gas as an Economic Fuel for Commercial Transit Buses.*

(45) MacDonald, J.S., and Simon, G.M. (Advanced Product Engineering GMC); *Development of a Particulate Trap System for a Heavy-Duty Diesel Engine*, SAE paper 880006.

(46) Ullman, T.L., Hare, C.T. (Southwest Research Institute), and Baines, T.M., (U.S. EPA); *Preliminary Particulate Trap Tests on a 2-Stroke Diesel Bus Engine*, SAE paper 840079.

(47) Ha, K., Larocque, J.A. (O.R.F), and Strissa, F. (NYSERDA); *Development and Demonstration of an Automated Trap System for a New York City Bus*. Summary of Report Proceedings presented at the Fourth Windsor Workshop on Alternative Fuels, juin 1988.

(48) Communication avec B. Fogorus, DDC, mars 1989.

(49) Correspondance entre A. Lawson, Ortech et B.A. James, EMR Canada, en date du 26 juillet 1989.

(50) Communication avec S. Miller, DDC, juillet - août 1989.

(51) Tsunemoto, T., Takatuki, T., et al.; *Cold Startability of a Spark Assisted Alcohol Diesel Engine*, Isuzu Motors Ltd., Kitami Institute of Technology.

(52) Seiffert, U. (Volkswagen AG); *Status of German/European Exhaust Emissions Legislation*, SAE 851211.

(53) *Comparing the Impacts of Different Transportation Fuels on the Greenhouse Effect* ; rapport préparé par CEC pour Accurex, avril 1989.

(54) Titre du mémoire : *Facility Conversion Costs for Methanol/Compressed Natural Gas (CNG) Usage* de P.G. Saklas; N.J. Transit Bus Operations Inc. en date du 13 janvier 1989, à G.W. Heinle.

(55) Baranescu, R.A. (Navistar Int.): *Influence of Fuel Sulphur on Diesel Particulate Emissions*, SAE 881174.

(56) Proposed amendments to Title 13, California Code of Regulations, Section 1956.8. State of California, Air Resources Board. Envoi #89-30.

(57) Yanagihara, H., Tsukahara, K., et al.: *A New Approach to Methanol Combustion in Direct Inject Diesel Engine*, Toyota Motor Corporation, Nippon Denso Co.

(58) Kurihara, K., Agusawa, T., and Kime, E.: *Study of Design Data for DI Spark-Assisted Methanol Vehicle through Prototype Vehicle Driving Test*, Japan Automobile Research Institute (JARI), Tsukuba.

(59) Urban, C.M. (Southwest Research Institute): *Additive Enhanced Methanol Engine Evaluation*; rapport préparé à l'intention de Sypher:Mueller International Inc. juin 1989.

(60) Doyle, D.M. et al.: *Application of an Advanced In-line Injection System to a Heavy-Duty Diesel Engine*, Ricardo Consulting Engineers, SAE 891847.

(61) Needham, J.R. et al.: *Developing the Truck Engine for Ultra-Low Emissions*, Ricardo Consulting Engineers.

(62) *Clean Diesel Technology - The International 94 Smokeless Diesel*, Navistar International Corp. 1990.

(63) Williams, P.T. et al.: *The Role of Lubricating Oil in Diesel Particulate and Particulate PAH Emissions*, University of Leeds, U.K. SAE 872084.

(64) Jakobs, R.J., and Westbrooke, K.: *Aspects Influencing Oil Consumption in Diesel Engines for Low Emissions*, Goetze Corporation, SAE 900587.

(65) Needham, J.R. et al.: *Technology for 1994*, Ricardo Consulting Engineers. SAE 891949.

(66) Pilley, A.D. et. al.; *Optimization of Heavy-Duty Diesel Engine Transient Emissions by Advanced Control of a Variable Geometry Turbocharger*, Ricardo Consulting Engineers, SAE 890395.

(67) Narusawa, K. et al.; *An EGR Control Method for Heavy-Duty Diesel Engines under Transient Operations*, Ministry of Transport, Japan, SAE 900444.

(68) Barris, M., and Rocklitz, G.; *Development of Automatic Trap Oxidizer Muffler Systems*, Donaldson Company Inc., SAE 890400.

(69) Kitagawa, K. et al.; *Effects of DPF Volume on Thermal Shock Failures During Regeneration*, NGK Insulators Ltd., SAE 890173.

(70) Barris, Marty A.; *Durability Studies of Trap Oxidizer Systems*, Donaldson Company Inc., SAE 900108.

(71) Hayashi, K., Ogura, Y., Kobashi, K., Sami H., (Toyota Motor Corp.); and A. Fukami (Nippodenso Co. Ltd.); *Regeneration Capability of Wall-Flow Monolith Diesel Particulate Filter with Electric Heater*, SAE 900603.

(72) Communication, mai 1990, Donaldson Co. Ltd.

(73) Ha, K., Larocque, J., (Ortech International), Walsh, J., Skabowski A., (New York City Transit Authority), and Goldberger, L., (New York City Department of Environmental Protection), *Field Evaluation of a Diesel Particulate Trap System for a 6V-92TA Transit Bus Engine*, SAE 900112.

(74) Pattas, K. et al.; *On-Road Experience with Trap Oxidizer Systems Installed in Urban Buses*, Université Aristote de Thessaloniki, Athènes, Grèce, SAE 900109.

(75) Oikawa, H. et al.; *Catalyst-Assisted Regeneration System for a Diesel Particulate Trap*, Mitsubishi Motors Corp., SAE 900324.

(76) Horiuchi, M. et al.; *The Effects of Flow-Through Type Oxidation Catalysts on the Particulate Reduction of 1990s Diesel Engines*, Nippon Shokubai Kagaku Kogyo Co. Ltd.

(77) Communication, avril 1990, Volvo Corporation, Gothenburg, Suède.

(78) Macdonald, J. Scott, and Simon, G.M.; *Development of a Particulate Trap System for a Heavy-Duty Diesel Engine*, General Motors Corporation, SAE 880006.

(79) Schulte, H. et al.; *The Contribution of the Fuel Injection System to Meeting Future Demands on Truck Diesel Engines*, FEV Motorentechnik GmbH, SAE 900822.

(80) Weidmann, K. et al.; *Diesel Fuel Quality Effects on Exhaust Emissions*, Volkswagen AG, Wolfsburg, GFR, SAE 881649.

(81) Knuth, H.W., and Garthe, H.; *Future Diesel Fuel Compositions - Their Influence on Particulates*, Kloeckner-Humboldt-Deutz AG, SAE 881173.

(82) Huehn, W., Sauerteig, J.E.; *The New Deutz Particulate Trap System for Trucks and Buses*, Kloeckner-Humboldt-Deutz AG, SAE 892494.

(83) Communiqué de presse de la Detroit Diesel Corporation intitulé *Detroit Diesel Corporation Unveils Transit Bus Engine Availability For 1991 Model Year*, le 18 juin 1990, Communiqué de presse R-1061.

ANNEXE

CYCLE DE RECHERCHE UNIFORMISÉ SUR LES ÉMANATIONS

A. INTRODUCTION

Les efforts axés sur l'uniformisation du cycle de recherche sur les émanations devraient permettre de combler l'un des fossées importants qui séparent les spécialistes de la recherche sur les moteurs dans le monde entier. Même si les méthodes d'essai réglementaires demeurent en vigueur dans la plupart des régions relevant d'un organisme compétent, l'existence d'un cycle d'essai international uniforme permettra aux chercheurs d'échanger librement les données relatives aux émanations et de faire des comparaisons rapides entre les diverses technologies touchant les moteurs au méthanol.

Dans les pages suivantes, nous allons indiquer quels problèmes fondamentaux doivent être résolus pour que les chercheurs puissent se mettre d'accord sur un cycle de recherche commun, et présenter des recommandations pour leur résolution. Une fois que nous aurons établi un cadre relatif à un cycle d'essai, nous recommanderons l'adoption d'un certain cycle et expliquerons pourquoi il devrait être accepté.

B. CONSIDÉRATIONS CONCEPTUELLES

Un cycle de recherche commun doit tenir compte de trois éléments principaux :

- méthode d'essai dynamométrique sur moteur ou sur châssis;
- genre de cycle d'essai (à phases stables ou transitoires);
- méthode de prélèvement et de mesure des échantillons.

Sur le plan du développement technique, la méthode d'essai sur moteur constitue le choix le plus logique étant donné que c'est l'essai sur moteur qui offre le plus de latitude pour sélectionner et modifier les moteurs à soumettre aux essais. Normalement, on ne soumet pas les moteurs de véhicules lourds aux essais dynamométriques sur châssis en raison des grandes variétés de forme des véhicules, du coût des installations nécessaires et du manque de données permettant d'établir des corrélations avec les résultats des essais dynamométriques des moteurs (1).

À mesure que les règlements sur les émanations deviendront plus sévères, le rendement des moteurs deviendra plus sensible aux changements dans les conditions d'utilisation. On a résumé les résultats obtenus en passant des

conditions de l'essai à phases stables à celles de l'essai à phases transitoires (3). Alors qu'un cycle d'essai à phases stables peut être relativement simple à réaliser, qu'il offre des données de base sur le rendement du moteur et qu'il nécessite un équipement moins coûteux, le cycle d'essai à phases transitoires offre les avantages particuliers suivants (2, 3, 4) :

- possibilité d'observer les phases transitoires pendant l'accélération et la décélération, en particulier d'observer l'effet d'une augmentation de l'alimentation en carburant;

- meilleure représentation du fonctionnement du moteur en pratique;

- possibilité d'observer l'effet du réchauffage du moteur.

Cependant, un cycle à phases transitoires fournit des indications sur un mode particulier de fonctionnement du moteur et non sur tous les modes de fonctionnement. Par ailleurs, le coût du matériel d'échantillonnage des émanations et du système de commande nécessaire aux essais à phases transitoires constitue une difficulté importante en ce qui concerne leur acceptation, surtout si l'on tient compte des exigences de l'EPA relatives au fonctionnement non autonome du moteur*

L'effet produit par le carburant au méthanol, comparativement au carburant diesel, sur les émanations gazeuses soumises à la réglementation est une autre raison importante de favoriser le cycle d'essai à phases transitoires par rapport au cycle d'essai à phases stables. Les concentrations de HC totaux **, de CO et de particules ont tendance à être sensibles au rapport air-carburant et les moteurs de véhicules lourds au méthanol ont tendance à produire des concentrations plus élevées de HC totaux et de CO par comparaison au moteur diesel de base. Les essais à phases transitoires peuvent aider à créer des périodes où le rapport air-carburant est trop riche ou trop pauvre, donc à aider les chercheurs en faisant ressortir toute déficience potentielle d'un moteur donné.

---

* On entend par fonctionnement non autonome du moteur le fonctionnement sous intervention du conducteur, par exemple pendant le freinage ou lors de la marche au débrayé.

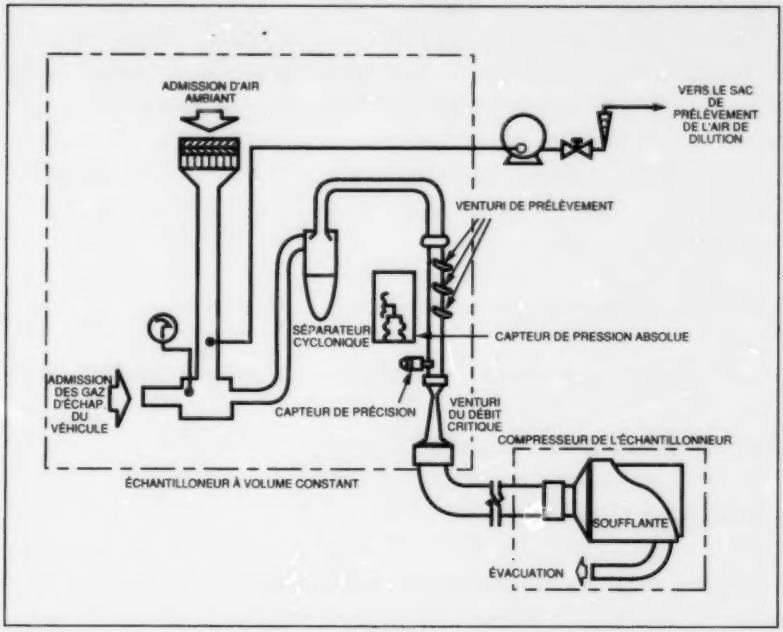
** Les HC totaux représentent la somme des HC non oxygénés et des HC oxygénés, plus les aldéhydes.

En plus proposer un cycle de recherche uniforme, on doit chercher à établir un consensus sur les techniques d'échantillonnage et de mesure des émanations, de même que sur les méthodes de présentation des rapports. À l'heure actuelle, comme on l'a vu à la section II, il semble qu'il y ait un consensus assez large à l'égard de la technique de mesure des émanations gazeuses soumises aux règlements. Étant donné que le but ultime de la recherche sur le moteur au méthanol est de diffuser plus largement les données relatives aux émanations, il est nécessaire d'adopter des techniques de mesure standardisées. Voici quels sont les fossés à combler :

- méthode d'échantillonnage;
- solution des problème relatifs aux particules et à la fumée;
- mesure des concentrations de HC;
- présentation des résultats finaux.

L'échantillonnage des gaz d'échappement d'un moteur en phase transitoire est plus compliqué que l'échantillonnage en phase stable. Pour prélever le volume variable de gaz d'échappement produit à n'importe quel moment d'un cycle d'essai à phases transitoires on a mis au point la technique de l'échantillonnage à volume constant. Un échantillonneur à volume constant, comme celui qui est illustré à la figure 1, mélange un volume d'air ambiant variant constamment avec les gaz d'échappement bruts de façon à produire une vitesse d'écoulement constante de gaz d'échappement dilués aux fins d'échantillonnage. La technologie de l'échantillonnage à volume constant est bien développée et a été utilisée pendant des années aux États-Unis pour tous les moteurs, et en Europe et au Japon pour les automobiles et les véhicules légers. Mais les installations ne sont pas toutes équipées du matériel nécessaire au traitement du volume plus élevé de gaz d'échappement engendré par les moteurs de véhicules lourds. Dans le cas de l'échantillonnage des émanations en phase stable, le matériel d'échantillonnage des gaz d'échappement n'a pas besoin d'être aussi perfectionné puisque l'on se contente de prélever des échantillons de gaz à une série de points discrets bien définis.

Figure 1. Échantillonneur à volume constant (5)



Le méthanol engendre de très faibles émissions de particules par rapport aux carburants diesel. À l'heure actuelle, seuls le Canada et les États-Unis ont adopté des règlements relatifs aux émissions de particules. L'Europe et le Japon se sont concentrés sur la fumée et la mesure de son opacité. La création d'un cycle de recherche à phases transitoires pour les moteurs au méthanol ne devrait cependant pas exclure la mesure des particules dégagées. Les mesures concernant la fumée sont relativement simples à effectuer aux points du cycle à phases stables ou pendant une phase d'accélération prescrite. Toutefois, ces mesures ne peuvent rendre compte de la masse et de la composition des matières solides contenues dans les gaz d'échappement. Les particules se composent de suie, de fractions organiques solubles et d'oxydes (6). Bien que les gaz d'échappement des moteurs au méthanol ne contiennent qu'une quantité très réduite de particules, la mesure de ces particules permettra cependant aux chercheurs de noter le contenu massique des solides filtrables des gaz d'échappement et d'examiner leur composition.

La mesure des particules a beaucoup d'importance pour ceux qui désirent vendre leurs moteurs aux États-Unis étant donné l'imminente entrée en vigueur de règlements à ce sujet. Ayant à réduire les émissions de particules, les fabricants de moteurs s'efforceront de les réduire encore davantage en configurant leurs futurs moteurs de façon à les doter d'une chambre de combustion modifiée pour y limiter l'entrée d'huile lubrifiante.

Contrairement aux moteurs diesel similaires, les moteurs de véhicules lourds alimentés au méthanol produisent des HC oxygénés en plus des HC non oxygénés et des aldéhydes. Il est extrêmement important de mesurer et d'identifier les trois concentrations d'hydrocarbures. On s'est inquiété de la réactivité de certaines catégories de HC. La technique servant actuellement à enregistrer les HC émanant d'un moteur diesel à l'aide d'un détecteur d'ionisation de flammes n'enregistre pas exactement les concentrations de carburant non brûlé (les HC oxygénés) ou d'aldéhydes dans les gaz d'échappement (7). On a utilisé avec succès des techniques telles que celle qui consiste à se servir de cartouches enduites de 2,4 dinitrophénylhydrazine (DNPH) pour prélever des échantillons d'aldéhyde (8). L'EPA a proposé des modifications aux normes sur les émanations et aux méthodes d'essai existantes de façon à y incorporer l'utilisation de cartouches de 2,4 DNPH pour prélever les aldéhydes des gaz d'échappement. De la même façon, on s'est servi d'impacteurs d'eau distillée pour recueillir le carburant (méthanol) non brûlé contenu dans les gaz d'échappement.

La façon de présenter les résultats finaux des essais est extrêmement importante si l'on veut permettre aux chercheurs de faire des comparaisons dos à dos des résultats des essais. La présentation des trois valeurs des HC, des résultats de la détection d'ionisation de flammes relatifs aux hydrocarbures non oxygénés, corrigés pour tenir compte du carburant non brûlé, et des aldéhydes permettra aux chercheurs de faire ces comparaisons et de former leurs propres opinions.

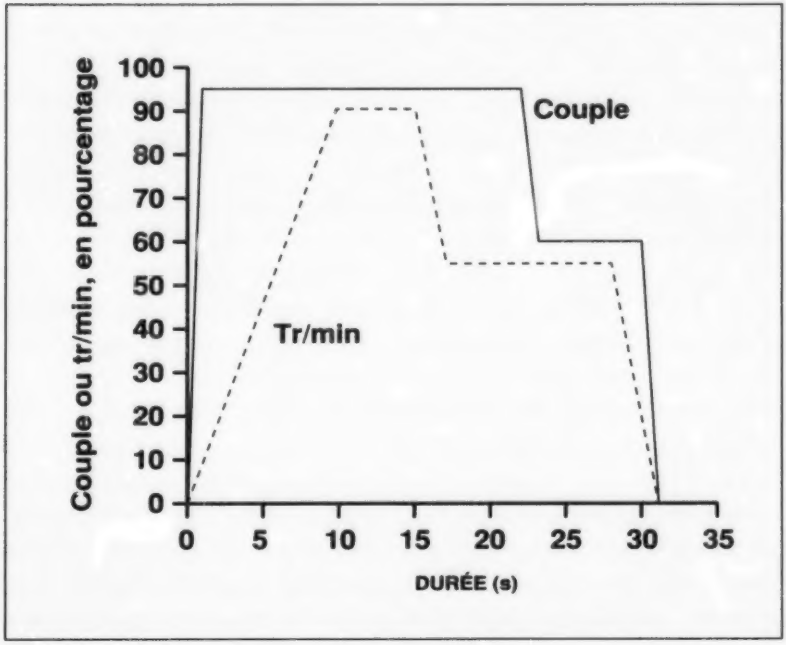
C. LE CYCLE D'ESSAI

Dans la section précédente, nous avons traité des nombreuses complexités touchant le développement d'un cycle d'essai sur les émanations. En conséquence, tout cycle appelé à devenir universellement accepté par ceux qui s'intéressent aux moteurs au méthanol doit faire appel à des techniques relativement communes et acceptées, surtout si l'on tient compte de la tendance

de la plupart des gens à présenter les résultats en se basant sur l'une des techniques réglementaires.

Pour combler le fossé perçu en termes de cycles d'essai, la société SYPHER:MUELLER International Inc. propose un cycle de recherche axé sur les émanations illustré au graphique 2.

Graphique 2. Cycle de recherche sur les émanations des moteurs au méthanol proposé par SYPHER, un seul segment



P. cent tr/min = (tr/min réels - tr/min au ralenti)/(tr/min nominaux - tr/min au ralenti) * 100

P. cent du couple = couple réel/(couple max. aux tr/min réels) * 100

Le cycle est axé sur l'essai du moteur. En voici les principales caractéristiques :

- accélérations/décélérations en douceur;
- accélérations/décélérations rapides;

- normalisation des vitesses du moteur et des couples;

- non intervention du conducteur;

- préférence à l'égard de l'utilisation en milieu urbain.

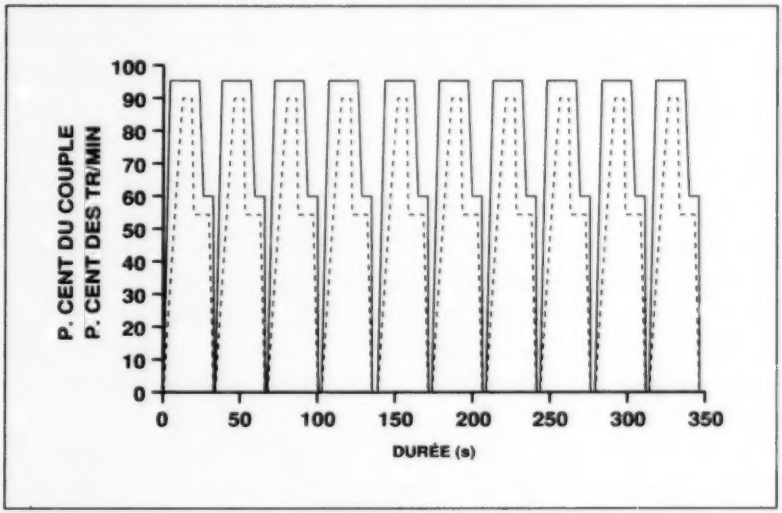
Dans le cycle proposé, nous avons déterminé les valeurs du couple et de la vitesse en nous basant sur les règlements et la documentation courants ainsi que sur des conversations avec diverses personnes du secteur industriel (2, 3, 9, 10, 4, 11). En conséquence, le cycle proposé offre certaines similitudes avec le cycle d'essai dynamométrique sur châssis en centre-ville. La charge réelle pendant le cycle d'essai est présentée en termes de vitesse du moteur (tr/min) et de couple (C) normalisés. Nous avons adopté ces conventions en nous fondant sur des méthodes largement pratiquées, y compris les méthodes d'essai fédérales aux États-Unis.

Le recours à des couples et à des régimes moteur normalisés permet de comparer assez bien des moteurs à capacités nominales très variables sur une base de puissance au frein spécifique. Une sélection rigide de puissances et de vitesses permettrait de faire des comparaisons entre tous les moteurs en se basant sur le travail fourni pendant le cycle. Toutefois, cela aurait pour effet de pénaliser injustement certains moteurs qui ne pourraient réaliser toutes les opérations prescrites ou dont on exigerait un mode de fonctionnement trop différent de leur mode de fonctionnement idéal.

Pour que l'essai sur les émanations soit complet, il faudrait qu'il se poursuive pendant dix répétitions du cycle (graphique 3). Ces dix répétitions permettraient aux utilisateurs d'évaluer les émanations d'ensemble du moteur en présence d'accélérations répétées. Le cycle d'essai commencerait après le démarrage du moteur et la stabilisation du régime de ralenti. On pourrait laisser le moteur tourner au ralenti pendant 30 à 60 secondes pour simuler, par exemple, l'action du conducteur laissant à la pression d'air du véhicule le temps de monter. On pourrait alors commencer l'essai. Si l'on voulait effectuer les essais à chaud ou à froid, on disposerait d'un certain nombre de choix. Idéalement, on pourrait recourir à deux essais : le premier consisterait à simuler un démarrage à froid et le second à effectuer un essai à chaud subséquent après avoir laissé le moteur complètement réchauffé se reposer pendant dix minutes. Un essai à froid équivaut à ce qui se passe en réalité lorsqu'on fait démarrer le véhicule. Pour des raisons pratiques, il faudrait que la température à froid corresponde à la

température ambiante de la salle étant donné que les basses températures de démarrage imposées pourraient se situer au-delà de la plage de fonctionnement de certains moteurs, ou s'avérer impossibles à atteindre en raison des limitations des installations ou encore ne pas correspondre aux températures de fonctionnement normales de certains pays. çtant donné que le cycle se situe dans une perspective de recherche, il faudrait présenter les données sur le démarrage à chaud et à froid, et non sous forme de moyenne pondérée.

Graphique 3. Cycle de recherche sur les émanations des moteurs au méthanol proposé par SYPHER, segments multiples

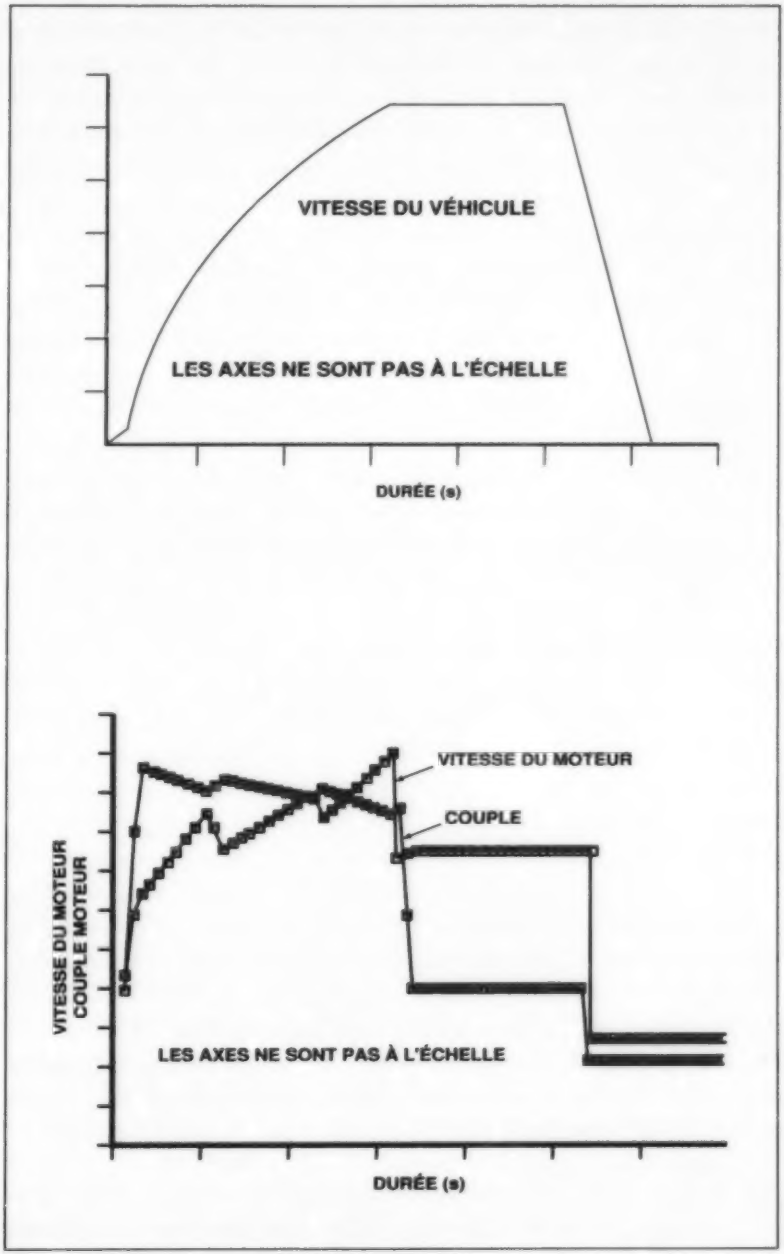


Un cycle à phases transitoires sert à simuler un certain genre de fonctionnement du moteur. Dans le cas du cycle SYPHER, nous avons choisi des rampes de charge/décharge en douceur parce qu'elles sont faciles à reproduire. Et, ce qui est encore plus important, un profil de vitesse ou de charge plutôt irrégulier comportant de nombreuses crêtes, tend à donner l'impression d'un genre de fonctionnement particulier. Le cycle à phases transitoire de l'EPA en est un exemple bien connu. Ce type de cycle comporte des changements plutôt prononcés et soudains de la vitesse et de la charge au moteur de manière à simuler les nombreuses nuances du fonctionnement réel. On pourrait citer des exemples similaires touchant les cycles d'essai dynamométrique sur châssis qui présentent la vitesse du véhicule par rapport à la durée. On a élaboré les cycles

en question en munissant les véhicules d'instruments, en enregistrant les données de fonctionnement et en convertissant leur mode de fonctionnement habituel en cycle de vitesse du véhicule ou en un ensemble de conditions de vitesse et de charge au moteur de façon à simuler le fonctionnement réel du véhicule. Bien qu'un tel cycle peut-être plus représentatif du fonctionnement en pratique, l'introduction "d'un nouveau cycle" va probablement engendrer une réaction négative, surtout de la part des utilisateurs qui jugeront que le cycle prescrit n'est pas représentatif des conditions de fonctionnement auxquelles est soumis leur produit. Si l'on exige des gens qu'ils utilisent un nouveau cycle qui semble simuler un genre de fonctionnement très particulier, il est probable que les critiques s'amplifieront. À un certain moment, la société Caterpillar, aux États-Unis, avait vigoureusement contesté le cycle de l'EPA et élaboré son propre cycle à phases transitoires qui, croyait-elle, représentait mieux la façon dont un moteur fonctionne réellement sur route et en ville. De son côté, l'association des fabricants de véhicules automobiles a contesté avec succès le cycle d'essai des moteurs à essence de véhicules lourds de l'EPA et a par la suite adopté son propre cycle à phases transitoires, lequel sert désormais à l'homologation des moteurs dans tous les États, sauf en Californie.

Comme beaucoup d'autres cycles à phases transitoires largement utilisés, le cycle proposé ferait appel à une application rapide de la charge au moteur, de façon à simuler l'inertie requise pour faire accélérer un véhicule à partir d'une position stationnaire et le faire passer en vitesse de croisière. En réalité, on s'attendrait à ce que, lorsque la vitesse du moteur augmente et que le véhicule commence à se déplacer, le couple nécessaire soit moindre. En conséquence, dépendant du moteur, de la boîte de vitesses, du rapport du pont et des conditions de circulation, le conducteur changerait de rapport et la vitesse du moteur commencerait à remonter, tandis que la valeur du couple commencerait à baisser. Ce mode de fonctionnement se répéterait jusqu`a ce que le conducteur soit passé en vitesse de croisière, ce qui, dans des conditions idéales, se traduirait par une uniformité de la vitesse et du couple sur route. Ce scénario est illustré au graphique 4. Bien qu'ils dérivent d'un scénario particulier, les profils du graphique 4 peuvent être considérés comme représentatifs du scénario idéal décrit ci-dessus, c'est-à-dire d'un cycle comprenant : accélération; croisière; marche au débrayé/freinage.

Graphique 4. Phase idéalisée d'accélération et de conduite (9)

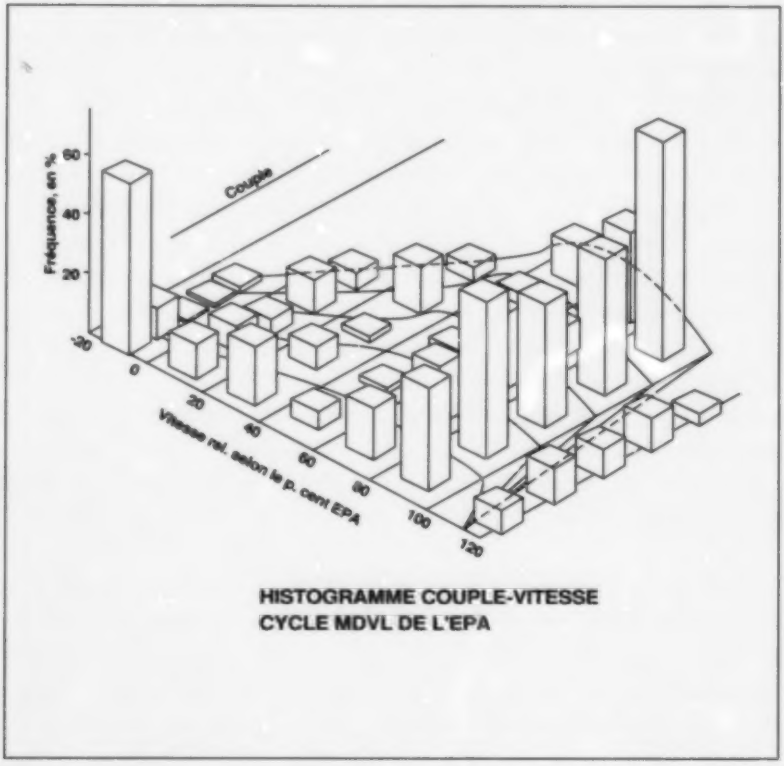


Le graphique et les commentaires qui précèdent illustrent jusque-là un problème classique auquel sont confrontés ceux qui conçoivent les cycles d'essai des moteurs. Tout d'abord, il est nécessaire de caractériser le fonctionnement du véhicule, ce que l'on peut généralement faire en observant sa vitesse pendant une période donnée. Si l'on veut appliquer ce profil à un moteur, il faut savoir comment le moteur se comporte pendant le cycle ou le genre de fonctionnement choisi. On peut recueillir les données sur le moteur directement, tout en compilant les informations nécessaires à la mise au point du cycle. Alternativement, on peut soumettre le véhicule à un essai dynamométrique sur châssis pendant le cycle choisi, et recueillir les paramètres de fonctionnement du moteur. Dans l'un ou l'autre cas, on recueille les paramètres relatifs au moteur alors que celui-ci est solidaire d'un véhicule. La configuration du véhicule et les habitudes de conduite auront certains effets sur la façon d'utiliser le moteur. C'est pourquoi, plutôt que d'essayer d'indiquer comment seront conduits les véhicules munis de moteurs diesel à grand rendement au méthanol, nous cherchons simplement, à l'aide du cycle proposé, à forcer le moteur à exécuter une série d'opérations transitoires ressemblant quelque peu à la façon dont un moteur est utilisé.

Au début du cycle, on cherche à simuler une accélération à partir d'une position de ralenti ou d'arrêt. Une fois que le véhicule a pris de la vitesse, la vitesse du moteur diminue et ne remonte jamais, contrairement à ce qui se produit lors d'un changement de rapport de vitesse. Toutefois, le couple moteur diminue étant donné qu'il faut moins d'énergie pour permettre au véhicule de se déplacer. À la fin du parcours, le moteur (véhicule) s'arrête (ralenti). En mettant l'accent sur un cycle où le couple à moyenne et pleine vitesses est relativement élevé, nous voulons forcer le moteur à utiliser un rapport air/carburant relativement riche et éventuellement à engendrer des émanations plus importantes.

Les essais réglementaires à phases stables prescrits en Europe (R.49) et au Japon (6 modes), ainsi que l'essai américain (13 modes) périmé mettaient l'accent sur le fonctionnement du moteur dans la zone vitesse intermédiaire/couple maximal. L'essai américain à phases transitoires des moteurs diesel de véhicules lourds marque lui aussi une préférence pour cette zone de fonctionnement du moteur (graphique 5).

Graphique 5. Pondération relative de l'essai sur les émanations des MDVL, cycle transitoire de l'EPA (3)



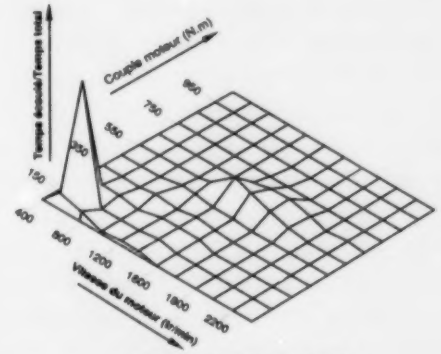
Dans le cycle proposé, nous évitons de recourir au fonctionnement non autonome du moteur pour simuler le freinage du véhicule. Il existe peu d'installations, même aux États-Unis, qui soient munies de dynamomètres d'essai de moteurs capables de se prêter à la simulation du fonctionnement non autonome du moteur. Ce genre de simulation pendant les essais à phases transitoires constitue un problème qui suscite beaucoup de controverses et de divisions. Son inclusion dans un cycle de recherche sur les émanations des moteurs au méthanol pourrait être mal interprétée par certains. En raison de cette controverse et du coût des matériels nécessaires, nous n'avons pas inclus le fonctionnement non autonome dans le cycle d'essai SMI. Nous recommandons également qu'on n'adopte aucune nouvelle mesure relative au

fonctionnement non autonome tant qu'un consensus global plus harmonieux n'aura pas été atteint.

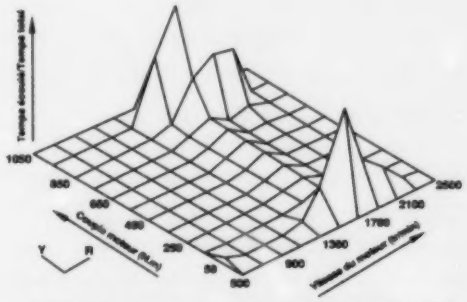
En dernier ressort, tout essai du moteur au dynamomètre, aussi simple soit-il, doit refléter le fonctionnement du véhicule sur route si l'on veut qu'il soit accepté. L'une des façons de mesurer l'authenticité du cycle est de recueillir des données réelles sur route. La série de cartes du graphique 6 présentant la vitesse du moteur et le couple moteur par rapport à la fréquence, illustre la durée relative de fonctionnement de divers moteurs à différentes valeurs de vitesse/couple. Toutes les cartes indiquent que, à l'exception des périodes de ralenti, les véhicules ont tendance à fonctionner aux alentours du couple maximal. Malheureusement, les cartes n'illustrent que les tendances en temps réel, c'est-à-dire en fonction des habitudes de conduite réelle, mais elles illustrent la tendance à conduire dans les gammes de vitesse moyenne du moteur et près des couples maximaux. On peut aussi attribuer ce genre d'utilisation à la configuration finale du véhicule qui, si elle a été conçue adéquatement, doit offrir un appariement convenable de la boîte de vitesses, du pont et du moteur en fonction du genre d'utilisation à laquelle on destine le véhicule. Toutes les cartes indiquent que ces véhicules étaient destinés à une utilisation à couple maximal.

Les données du graphique 6 s'appliquent aux moteurs alimentés au carburant diesel, mais font ressortir un point important touchant l'acceptation future du moteur au méthanol. La configuration des véhicules (boîte de vitesses et rapport de pont) équipés de moteurs au méthanol doit tenir compte des caractéristiques de rendement du moteur et de l'utilisation finale qui doit être faite du véhicule. Les données résultant du projet canadien MPMP concernant un camion et un autobus équipés de moteurs au méthanol confirment la tendance selon laquelle les conducteurs des véhicules à moteur au méthanol cherchent à conduire à des régimes de moyenne et grande vitesses et près du couple maximal. Dans le graphique 7, nous représentons des données relatives à la position de la crémaillère de la pompe à carburant au lieu de données relatives à la charge au moteur ou au couple. La position de la crémaillère indique quel est le débit de carburant, donc la puissance développée.

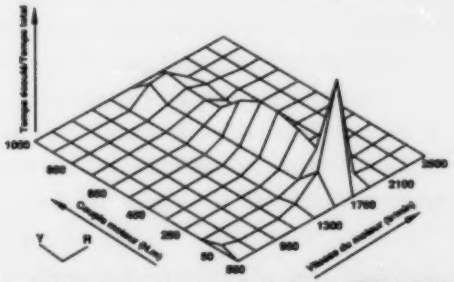
Graphique 6. Profils de fonctionnement des moteurs, véhicules européens (3)



(a) Circuit d'autobus urbain

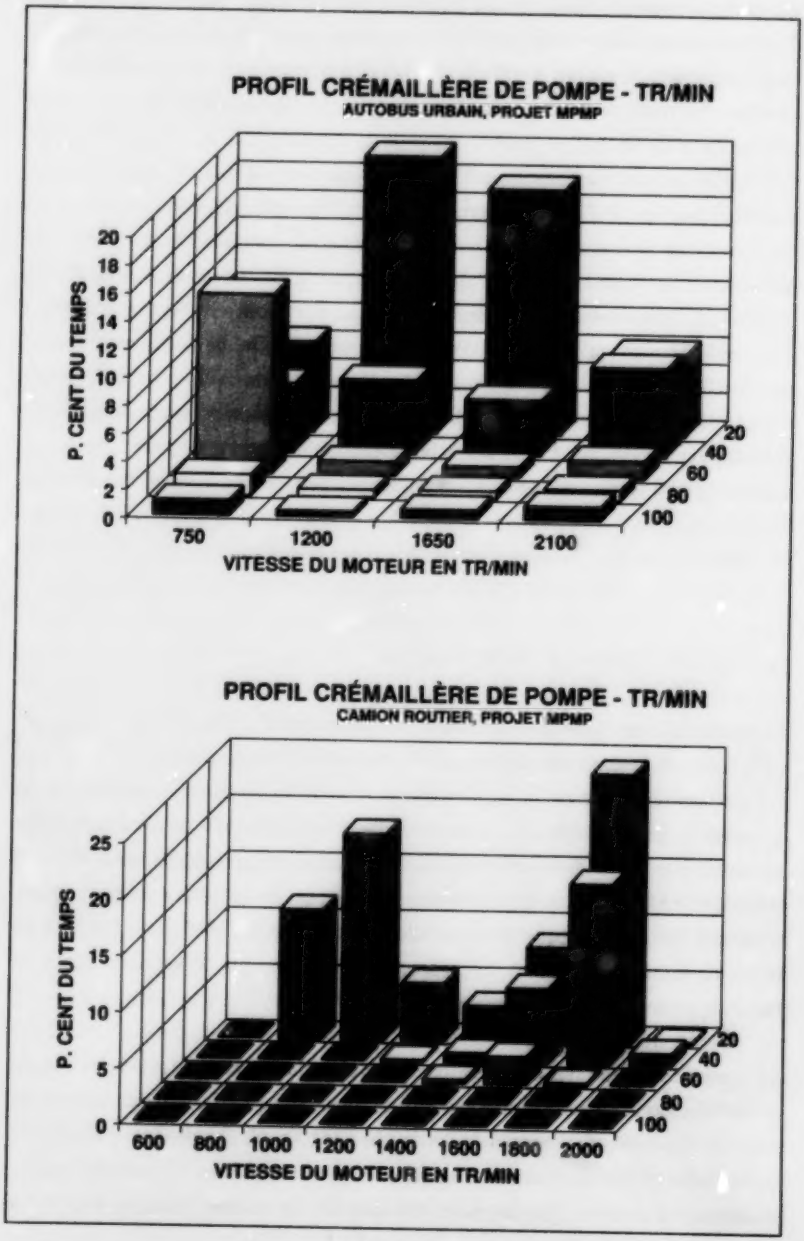


(b) Camion; circuit sur routes diverses (PNBV : 38 t)



(C) Camion; circuit/sur routes principales (PNBV : 18 t)

Graphique 7. Profils de fonctionnement des moteurs, véhicules canadiens propulsés au méthanol (12)



Nous avons conféré au cycle d'essai un caractère répétitif (charge, ralenti et diminution de la charge au moteur) de façon à mieux simuler le fonctionnement en milieu urbain. Nous avons opté pour cette solution parce que c'est l'utilisation en milieu urbain qui, probablement, force le moteur à fonctionner dans la gamme de phases transitoires la plus rigoureuse qui soit, c'est-à-dire en continuelles reprises de vitesse et de charge. Sur le plan des émanations, c'est la qualité de l'air en milieu urbain qui pose le problème le plus important. Les fabricants de moteurs du monde entier, y compris Detroit Diesel, MAN, Daimler-Benz et Volvo, ont concentré leurs efforts relatifs à la propulsion au méthanol sur la conception de moteurs probablement destinés à équiper des autobus de transport urbain. Cela peut être dû au désir de conformité aux règlements américains sur les émanations qui entreront en vigueur en 1991. Comme il semble qu'il s'agisse d'un segment du marché particulièrement visé par les fabricants de moteurs, un cycle d'essai devrait convenir à ce genre d'utilisation. À l'avenir, un cycle de recherche sur les moteurs au méthanol plus raffiné devrait comporter des essais de simulation de conduite sur autoroute. On pourrait y parvenir en diminuant le nombre d'arrêts et en abaissant la valeur du couple pendant de longues périodes une fois que le véhicule s'est mis en vitesse de croisière.

D. LES MÉTHODES DE MESURE

Le recours à un cycle d'essai uniforme permettra de s'assurer que tous les véhicules sont utilisés de façon comparable, mais on devra également unformiser les méthodes de prélèvement et de mesure des échantillons pour s'assurer de la compatibilité des résultats finaux des essais. À la section B, nous avons vu que les méthodes de mesure des émanations gazeuses tendaient à être relativement uniformes. Les utilisateurs du cycle proposé doivent se mettre d'accord sur la technique d'échantillonnage des gaz d'échappement, sur la façon de mesurer les HC et de présenter les données les concernant, et sur la façon de mesurer les particules.

La tendance qui se dessine déjà chez les chercheurs et les fabricants est de publier les données concernant les émanations des hydrocarbures totaux ou de présenter les concentrations individuelles (hydrocarbures oxygénés, hydrocarbures non oxygénés et aldéhydes). Il est essentiel de recourir à cette pratique si l'on veut que les gens puissent être assez bien renseignés sur les

concentrations d'hydrocarbures. Le fait de déterminer les concentrations de carburant non brûlé et d'aldéhydes présente un inconvénient important en ce sens que les données en question exigent que l'on pratique en laboratoire, après l'essai, une analyse des émanations à l'aide d'un chromatographe liquide à haute pression et d'un chromatographe en phase gazeuse, qui sont deux appareils de laboratoire coûteux.

La technique d'échantillonnage et la mesure des particules sont deux domaines où l'on doit chercher à établir un consensus. À la section B, nous mentionnions que l'utilisation du cycle à phases transitoires nécessite l'emploi d'un échantillonneur à volume constant. La documentation sur cette question renferme des descriptions d'autres techniques permettant de prélever des échantillons dans un courant de gaz à débit variable (13, 14, 15, 16). Ces appareils vont de l'échantillonneur miniaturisé, c'est-à-dire de la mesure des gaz d'échappement bruts qui traversent un piège à condensat et un piège à particules, jusqu'aux prélèvements successifs de gaz d'échappement à chaque segment du cycle à phases transitoires grâce à un dispositif comprenant un collecteur et une électrovanne. Tous les dispositifs décrits ci-dessus ont un point en commun : il s'agit de dispositifs expérimentaux conçus pour la recherche sur les émanations. L'utilisation d'un quelconque dispositif d'échantillonnage à volume constant devrait donc constituer un point de départ logique pour tout cycle d'essai proposé. Il n'est peut-être pas nécessaire d'utiliser un échantillonneur à volume constant aussi complet que celui que décrivent les règlements américains. Néanmoins, quelque soit le dispositif choisi, il doit produire des résultats répétables et, idéalement, permettre d'établir une corrélation entre les résultats obtenus à l'aide des techniques prescrites dans les règlements. L'emploi d'un échantillonneur à volume constant permettra également de prélever continuellement des particules pendant toute la durée du cycle. Pour les raisons mentionnées à la section B, il est encore très souhaitable de procéder à l'échantillonnage des particules.

Plus les questions environnementales deviendront préoccupantes, plus les fabricants de moteurs subiront de pressions les obligeant à les perfectionner ou à développer de nouvelles technologies. On a découvert que le méthanol est l'un des carburants de rechange qui pourrait aider à calmer les inquiétudes relatives à la qualité de l'air. Mais avant que le méthanol ne soit largement accepté , on doit continuer à étudier la technologie de sa combustion dans des moteurs du type diesel et ses effets sur les émanations. L'adoption d'un cycle de recherche

commun sur les émanations constituerait un point de départ solide en ce sens. Un cycle commun permettrait de coordonner les efforts, d'accélérer le processus de développement et d'en réduire le coût chez les fabricants de moteurs. Toutefois, le cycle d'essai n'est pas destiné à remplacer le processus de conformité à d'éventuels règlements.

Les fabricants devront encore se soumettre éventuellement aux exigences de conformité. Un essai de recherche commun permettra à la communauté internationale de coordonner ses efforts. Parallèlement au cycle de recherche, les fabricants désireront peut-être, sur le plan individuel, établir une corrélation spécifique entre les paramètres relatifs aux moteurs du cycle de recherche et ceux d'un essai réglementaire donné. De cette façon, les fabricants pourront, sur le plan individuel, participer à un échange d'informations commun tout en oeuvrant à la fabrication d'un produit commercialisable conforme aux règlements sur les émanations.

E. CONCLUSIONS

1. Pour que le cycle d'essai basé sur la recherche soit un succès, il doit être largement accepté et utilisé.

2. Étant donné que les moteurs de véhicules lourds sont soumis à une charge et à une utilisation dynamiques, un cycle de recherche basé sur des phases transitoires permettra de simuler de façon réaliste un certain profil d'émanations et donc de les prédire.

3. Pour faire adopter avec succès un cycle d'essai commun des moteurs au méthanol, il faut aussi uniformiser les techniques d'échantillonnage et de mesure des hydrocarbures ainsi que la manière de présenter les résultats des essais.

F. BIBLIOGRAPHIE

(1) Warner-Selph, M.A., and Dietzmann, H.E., (US EPA-Research Triangle Park); *Characterization of Heavy-Duty Motor Vehicle Emissions Under Transient Driving Conditions* Sommaire du projet, Rapport d'EPA, n° EPA-600/53-84-104, décembre 1984.

(2) Communication with sources at Caterpillar Inc., avril 1988.

(3) Cornetti, G.M., Klein, K., Frankle, G.J., and Stein, H.J., (Comité des constructeurs d'automobiles du Marché commun); *US Transient Cycle Versus ECE R.49 13-Mode Cycle*, SAE paper 880715.

(4) Communication with sources at U.S. EPA, octobre 1988.

(5) Emissions Control Technology Division, U.S. EPA; *Proposed Emissions Standards and Test Procedures For Methanol-Fuelled Vehicles*, Ébauche de règlements, été 1986.

(6) Richards, R., and Sibley, J.E., (Caterpillar Inc.); *Diesel Emissions Control for the 1990s*, published in Automotive Engineering, Vol. 96, No. 9, septembre 1988 (P. 63-69).

(7) Submission by the State of California Air Resources Board, in response to docket No. A-84-05 (EPA's Notice of Proposed Rule Making - le 29 août 1986) le 26 novembre 1986.

(8) Manitoba Research Council; *The Effects of Extended Storage Time on the Quantitation of Carbonyls Sampled on 2,4 DNPH Coated Silica Gel Cartridges*, rapport préparé à l'intention de SYPHER:MUELLER International Inc., le 5 octobre 1987.

(9) Drummond, W., Carmichael, I., and Goetz, W., (Ontario Research Foundation); *Comparative Evaluation of Bus Engines on Diesel, Propane, Natural Gas and Methanol*, Report No. 5067/6 ED/AET/87-59, rapport préparé à l'intention du ministère du Transport et des Communications de l'Ontario et de la Division de l'énergie destinée aux transports, Énergie, Mines et Ressources Canada, le 20 octobre 1987.

(10) Communication with sources at Mack Truck, septembre 1988.

(11) Communication with sources at Detroit Diesel Corporation, septembre 1988.

(12) Projet MILE Sommaires mensuel DAS-1 des données sur les opérations, 1988.

(13) Randall, J.H., and Carlson, R.R., (Systems Control, Inc.); *Simultaneous Measurement of Engine-Out and Tail Pipe Mass Emissions*, SAE 790705.

(14) Staab, J., and Schurmann, D., (Volkswagen A.G.); *Measurement of Automobile Exhaust Emissions under Realistic Road Conditions*, SAE 871986.

(15) Potter, C.J., Bailey, J.C., Savage, C.A., Schmidt, B., Simmonds, A.C., and Williams, M.L., (Dept. Trade & Industry, Warren Spring Lab. U.K.); *The Measurement of Gaseous and Particulate Emissions from Light-Duty and Heavy-Duty Motor Vehicles Under Road Driving Conditions*, SAE 880313.

(16) Callahan, T.J., Ryan, T.W.III, Martin, S.F., (SWRI), and Waytulonis, R.W., (U.S. Bureau of Mines); *Comparison of Predicted and Measured Diesel Exhaust Emissions Levels During Transient Operation*, SAE 872140.